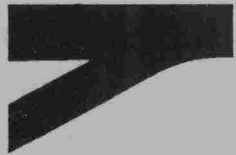
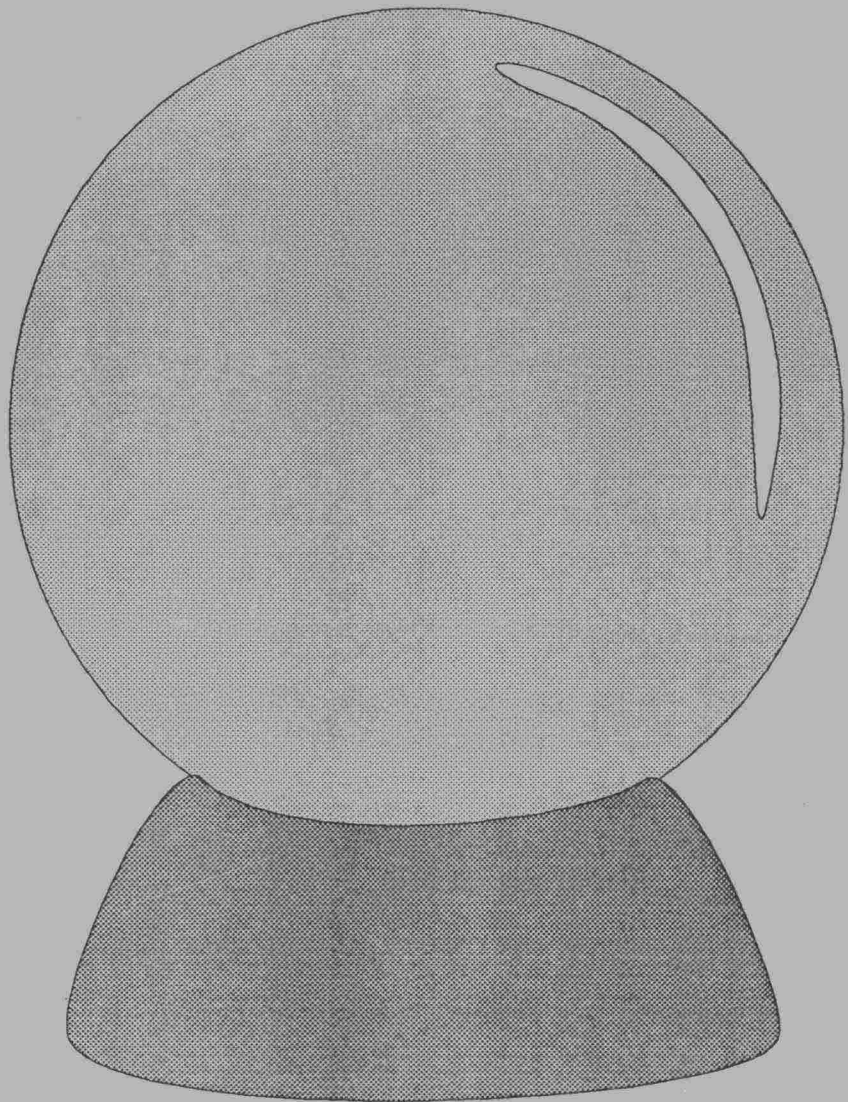


Lätkä kirj. Tk-114/21.8.92



**Tielaitos**

## Päällystetyn tien kuntoennusteet



Tielaitoksen  
selvityksiä

35/1992

Helsinki 1992

Tiehallitus  
Tuotannon  
kehittämispalvelut

21.8.1992

Tk-111 3/32/92

Jakelussa mainitut

## PÄÄLLYSTETYN TIEN KUNTOENNUSTEET -RAPORTTI

Tuotannon kehittämispalvelut lähettää ohessa tiedoksi raportin päällystetyn tien kuntoennusteista.

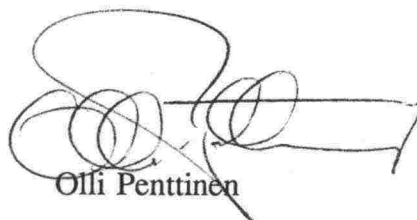
Tutkimuksen tavoitteena on ollut kehittää päällystetyn tien pintakunnolle ennustemalleja, jotka perustuvat viime vuosien tuotantomittauksiin.

Tuotantomittausten hyödyntäminen mallintamisessa osoittautui vaikeaksi. Samoja kohteita ei ole vielä kovin paljoa mitattu kahteen kertaan, eivätkä mittaustulokset aina ole täysin vertailukelpoisia.

Tutkimuksen tuloksena on laadittu ennustemallit kuntotietorekisteri Kurreen ja tarkistettu vastaavat mallit PMS91:ssä.

Lisätietoja saa tuotannon kehittämispalveluista Tuomas Toivoselta puh. 90-1487 2630

Apulaisjohtajan po:ssa  
Diplomi-insinööri  
Tuotannon kehittämispalvelut



Olli Penttinen

./..

LIITE

Päällystetyn tien kuntoennusteet

JAKELU

Tiepiirit

TIEH/T, S, GEO, Skk, To, Tt, Tk

Arvo Lähde

TIEL/V

Jani Saarinen

TIEL/H

Pekka Toiviainen

TIEL/O

Reijo Orama

TIEH/Geo

Kari Lehtonen

TIEH/Stk

Kari Hiltunen

TIEH/Tk

Pertti Virtala

TIEH/Tk

Heikki Jämsä

VTT

Jouko Belt

Oulun Yliopisto/Tie- ja liikennelab.

Juha Äijö

Viasys Oy

Mikko Saarinen

LTT Oy

Juha Kanninen

Prodax Oy

Tuomas Toivonen/TTo

Tielaitoksen selvityksiä  
35/1992

## **Päällystetyn tien kuntoennusteet**

**Tielaitos**  
Tiehallitus, tuotannon kehittämisspalvelut

Helsinki 1992



2. painos

ISBN 951-47-6068-9

ISSN 0788-3722

TIEL 3200089

Valtion painatuskeskus

Pasilan VALTIMO

Helsinki 1992

Julkaisua myy:

Tiehallitus, painotuotevarasto

**Tielaitos**

Tiehallitus

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. vaihde (90) 148 721

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena on ollut kehittää eri kuntomuuttujille ennustemalleja, jotka perustuvat viime vuosien kuntomittauksiin. Näitä malleja sovelletaan niissä TIEH:n järjestelmissä, jotka käyttävät ko. 100 m mittaustuloksiin perustuvia kuntotietoja. Malleilla täydennetään tai tarkistetaan tien kuntohistorian ekstrapolointiin perustuvia kuntoennusteita.

Työ on käsittänyt kolme vaihetta, kirjallisuustutkimuksen, asiantuntijahaastattelun ja mittaustuloksiin perustuvien ikäkäyttäytymismallien teon. Pääpaino on ollut lähtöaineiston muodostamisessa, testaamisessa ja eri mallivaihtoehtojen tutkimisessa. Tutkitut mallit ovat olleet tasaisuus- ja vauriomallit kesto- ja kevytpäällysteteille sekä uramallit kestopäällysteteille.

Kirjallisuustutkimuksen ja haastattelujen avulla selvitettiin eri vaurioiden kehittymisen periaatteita, syitä ja lisääntymistapaa. Näitä periaatteita sovellettiin eri mallien testaamisessa.

Tuotantomittausten hyödyntäminen mallintamiseen osoittautui monella tavalla vaikeaksi. Vaikka esim. vaurioinventointeja on tehty vuodesta 1986 lähtien, oli samoja kohteita inventoitu kahteen kertaan hyvin vähän. Palvelutasomittareiden luotettavuus todettiin hyväksi mutta myös tasaisuuden ja urien 100 m peräkkäisten vuosien mittaustulosten loogisuus oli hyvinkin kyseenalaista. Tuotantomittausten laadunvalvontaa tulee kehittää jatkuvasti.

Edellä mainitusta lähtöaineiston puutteista johtuen mallien selittävyys jäi huonoksi. Ennustemalleja käyttävien järjestelmien asettamista rajoituksista johtuen ei kaikkia rappeutumiseen vaikuttavia tekijöitä voitu ottaa malleihin mukaan.

Tasaisuuden osalta lopputulos oli projektiryhmän odotuksien mukainen. Urautumisen osalta ei tässä työssä saatu parannettua entisiä uramalleja, mutta niille kehitettiin maksimi- ja minimiraja-arvomallit. Vaurioiden osalta päädyttiin suosittamaan lisätutkimuksia ja käyttämään nykyisiä vauriomalleja maksimiraja-arvolla varustettuna.

Tien vaurioitumisen selittäminen eri mallien avulla on tärkeä ja samalla hyvin vaativa tehtävä. Tuotantomittausten ja kuntotietojen hyödyntämisen tulee olla vuorovaikutteista.

## ALKUSANAT

Tieverkon kuntomittauksia tehdään varsin laajassa mitassa. Tämän tiedon hyödyntäminen mahdollisimman monipuolisesti on tielaitoksessa kaikkien osapuolten etujen mukaista. Laajaan tietoaaineistoon perustuvia ikäkäyttäytymismalleja ei tätä ennen ole ollut edes mahdollista yrittää tehdä. Samalla voidaan korostaa niitä mittaustoiminnan tekijöitä, jotka siinä tulee ottaa huomioon laadukkaan tuloksen saavuttamiseksi.

Päällystettyjen teiden ylläpito-ohjelmistossa (PMS91) käytetään 1985 tehtyjä ura- ja vauriomalleja. Näiden päivittäminen sekä tasaisuusmallien luominen sekä kevyt- että kestopäällysteteille on ollut tämän työn tavoitteena. Samoja malleja tullaan käyttämään kuntotietorekisterin (KURRE) tietojen pohjalta tehtävissä ennusteissa. Tarkasteltava jakso on 100 m tieosuus.

Työ on perustunut lähinnä Hämeen ja Vaasan piirien ura-, tasaisuus- ja vauriomittausaineistoihin. Ura- ja tasaisuusmittaukset ovat vuosilta 1990 ja 1991 ja ne on mitattu piirien palvelusomittarilla. Vaurioinventointitietoja on vuosilta 1986-1991.

Tämän tutkimuksen on teettänyt TIEH/Tk konsulttityönä Viasys Oy:llä. Työryhmään ovat kuuluneet Tuomas Toivonen TIEH/Tk (projektipäällikkö), Kari Hiltunen TIEH/Tk, Jani Saarinen TIEL/H ja Arvo Lähde TIEL/V. Viasys Oy:stä työhön ovat osallistuneet Kimmo Tikka, Vesa Männistö ja Juha Äijö.

---

**PÄÄLLYSTETYN TIEN KUNTOENNUSTEET**
**Sisällysluettelo**

<b>1. Esimerkkejä olemassaolevista ratkaisuista</b>	<b>7</b>
1.1 HDM-III model	7
1.2 TRRL 833	12
1.3 VTT 1985 & 1988	13
1.4 Saskatchewan model	15
1.5 Duffel & al. 1990	17
1.6 Oulun yliopisto 1988-1991	17
<b>2. Asiantuntijahaastattelut : Rappeutumiseen vaikuttavat tekijät Suomessa</b>	<b>18</b>
2.1 Yleistä	18
2.2 Vauriot	19
2.3 Tasaisuus	22
2.4 Urat	22
2.5 Mittaustarkkuus	23
2.6 Tietolähteet	24
2.7 Toimenpiteen vaikutus vaurioitumiseen	25
<b>3. Käytettävissä oleva aineisto</b>	<b>26</b>
<b>4. Tieosakohtaisten mallien yleiset periaatteet</b>	<b>30</b>
4.1 Yleistä	30
4.2 Tavoitteet ja tarpeet tieosakohtaisille malleille	32
<b>5. Vaurioitumisen mallintaminen</b>	<b>33</b>
<b>6. Tasaisuuden mallintaminen</b>	<b>36</b>
<b>7. Urautumisen mallintaminen</b>	<b>36</b>
<b>8. Loppupäätelmät ja valittu toteutusmalli</b>	<b>38</b>
<b>9. Jatkotoimenpiteet</b>	<b>41</b>
Liitteet	42

---



## 1. ESIMERKKEJÄ OLEMASSAOLEVISTA RATKAISUISTA

### 1.1 MAAILMAN PANKIN HIGHWAY DESIGN MODEL III (HDM-III)

T.Watanatada, C. Harral, W. Paterson ...

The Highway Design and Maintenance Standards Model

Volume 1; Description of the HDM-III Model

Maaailmanpankki teki -70 ja -80 luvulla laajan tutkimuksen tieverkon ylläpidon ohjaamiseksi. Sen tuloksena on syntynyt HDM-malli, jonka kolmas versio on nykyisin käytössä. Työssä on tehty varsin perustavaa laatua olevia tutkimuksia tien rappeutumisesta, tienkäyttäjän kustannuksista ja tienpitäjän toimenpiteiden taloudellisuudesta. Esimerkkinä mainittakoon Brasiliassa vuosina 1975-1984 tehtyjen ajokustannustutkimusten budjetti, joka oli 30 milj USD. Koko HDM-tutkimuksen pääosat tehtiin Keniassa (1971-75), Karibian alueella (1977-82), Brasiliassa (1975-84) ja Intiassa (1977-83).

Vaikka HDM-III-mallit eivät suoraan sovellukaan Suomen olosuhteisiin, on HDM:n mallien tekoprosessi hyvä esimerkki meillekin. Vaurioitumismalli arvioi liikenteen, ympäristön ja tien iän yhteisvaikutusta tien kuntoon, kun tiedetään materiaalit ja tien rakenne. Päällystettyjen teiden kuntoa ennustetaan vaurioitumisen, purkautumisen, reikiintymisen, urautumisen ja tasaisuuden avulla. Hoito ja kunnossapitostrategiat vaikuttavat tien kestoikään. Ikäkäyt-  
tymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat: liikennemäärä ja raskaan liikenteen osuus, sademäärä ja kosteusolosuhteet, tien lähtökunto, rakennekerrosten materiaalien määrät ja laadut, rakennekerrosten homogeneisuus, rakentamisen laatu ja kunnossapidon laajuus.

#### VAURIOITUMINEN

Seuraavassa on lueteltu tekijöitä, joiden avulla tarkastellaan vaurioitumista:

**Rakenteen tunnusluvut** kertovat eri rakennekerrosten lujuudesta ja ominaisuuksista, esim. "structural number", kantavuusmittaukset (Benkelman palkki, Dynaflex ja FWD).

**Päällysteen luokitus** on tehty seitsemään eri luokkaan päällystetyypin kestävyys mukaan, esim. sirotepintauksesta...AB:hen betonikerroksen päällä. Kunnossapitotoimenpiteen vaikutus riippuu edellisestä päällystetyypistä ja uudesta päällysteestä.

**Liikenteen ominaisuudet** kuvataan kahden muuttujan avulla: liikennemäärä ja kuormituskertaluku (80 kN standardiakselien lukumäärä).

**Ympäristötekijät ja geometria** määritetään tiekohtaisesti pohjamaan ominaisuuksien ja sademäärän/kosteustilanteen/kuivatuksen mukaan. Geometrialla ei todettu olevan vaikutusta vaurioitumiseen. Huono geometria vaikutti ainoastaan lyhyillä osuuksilla kuivatuksen toimimattomuuteen. Tien leveyden vaikutusta ei pystytty tutkimaan.

**Epävarmuustekijät ja hajonta.** Vaikka tien rakenneominaisuusmuuttajat olisivat samanlaisia, voivat tiet rappeutua erilailla. Tämä aiheutuu monista tieverkon epähomogeenisuustekijöistä aina materiaaliominaisuuksista ympäristö- ja kuormitusolosuhteisiin. Epävarmuustekijän olemassaoloon tulee varautua.

**Mallien soveltaminen paikallisiin olosuhteisiin** tulee tehdä huolellisesti valitun otoksen avulla. Otokseen tulee sisältyä vanhoja ja uusia, vähä- ja vilkasliikenteisiä osuuksia eri ympäristö ja rakennetyyppien joukosta.

## VAURIOITUMISEN ALKAMINEN JA ETENEMINEN

Vaurioitumismalleja tehtiin erikseen kaikille vauriotyypeille ja leveille pitkittäishalkeamille. Taustamuuttujina olivat eri päälystetyypit ja rakenne-/pohjatyypit. Esimerkkinä sidotulla tai sitomattomalla alustalla vanhan AB:n päälle tehdyn AB:n malli vaurioitumisen alkuhetkelle:

$$T = K_{ci}(F_c * R + CRT) \quad (1)$$

missä  $R = \max [ R_{\max} (1 - PCRW/30), 0.025 HSNEW ]$

$T$  = ennustettu aika vaurioitumisen alkuun edellisestä päälystyksestä lähtien

$K_{ci}$  = käyttäjän määrittämä muuntokerroin vaurioitumisen alulle, oletusarvo 1

$F_c$  = olosuhdekerroin (ilmaston ja kosteuden mukaan)

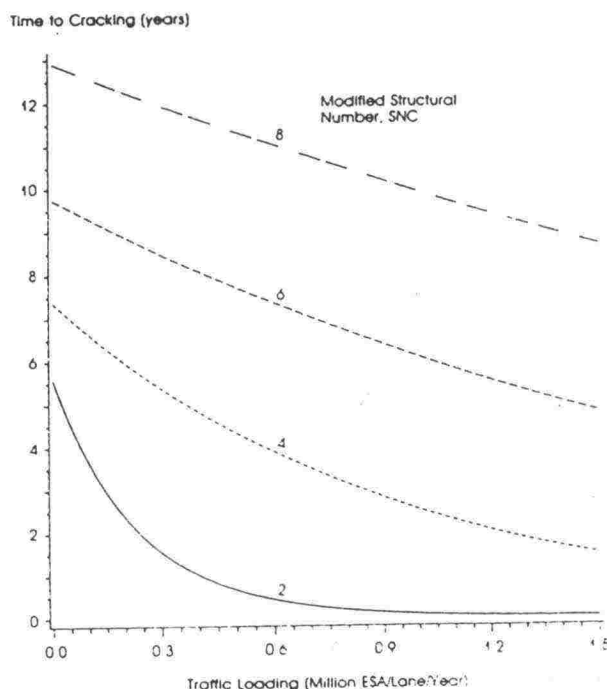
$CRT$  = kunnossapitotoimenpiteiden vaurioitumista hidastuttava vaikutus

$PCRW$  = vaurioitunut alue ennen edellistä toimenpidettä, % tien alasta

$HSNEW$  = viimeisen päälystekerroksen paksuus, mm

Kuvassa 1 on käyrät vaurioitumisen alkamisen määrittämiseen.

### (a) Asphalt concrete surfacing



Kuva 1. Vaurioitumisen alkaminen liikennemäärän ja rakenneindeksin (Modified structural number, SNC) mukaan kestopäälystetyllä tiellä.

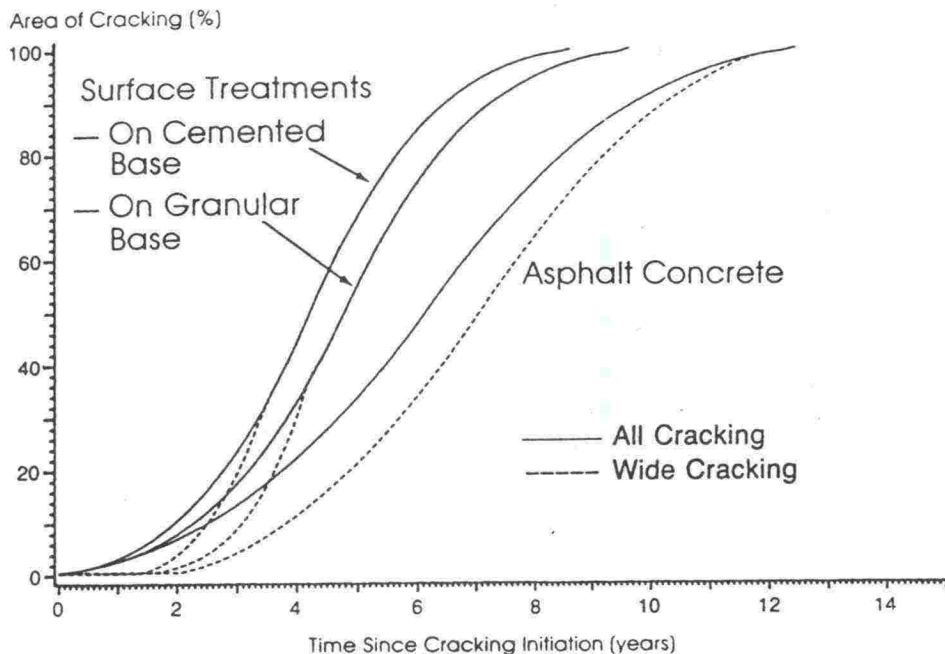
Vaurioitumisen eteneminen osoittautui epälineaariseksi, S:n muotoiseksi funktioksi, joka riippui vaurioiden määrästä ja vaurioitumisen alkuhetkestä. Liikennekuormitus ja rakenteen lujuus eivät tulleet merkittäviksi selittäjiksi. Aineisto osoitti, että vaurioitumisen etenemisellä ja materiaalien vaihtelulla, liikennemäärällä ja rakenteella oli yhteys ainoastaan vaurioitumisen alkamishetken kautta.

Funktio on symmetrinen ja yleisessä muodossaan:

$$dA_t = a_t SA_t^{1-b_t} dt \quad (2)$$

Kuvassa 2 on esitetty vaurioitumisen eteneminen päällystetyypeittäin.

(a) Original surfacings



Kuva 2. Vaurioitumisen eteneminen ensimmäisten vaurioiden jälkeen

## URAUTUMINEN

Kaikille pinta- ja rakennetyypeille on voimassa saman tyyppinen uramalli. Urautumisen keskihajonta selittää hyvin tasaisuutta (kaava 4)

Uramalli:

$$U = K \frac{39800 (KKL 10^6)^{ERM}}{SNC^{0.502} COMP^{2.3}} \quad (3)$$

U = urautuminen

K = kerroin olosuhdetekijöille

KKL = tieosan liikenteen kuormituskertaluku, milj./kaista [1/80 kN -aks.]

ERM = päällysteen ominaisuuksista riippuva tekijä

SNC = "modified structural number", SNC, rakenneindeksi

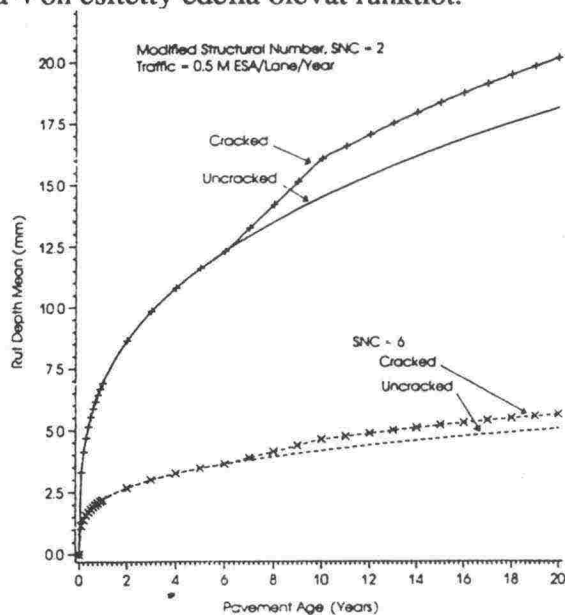
COMP = pohjamaan suhteellinen tiiveys [%]



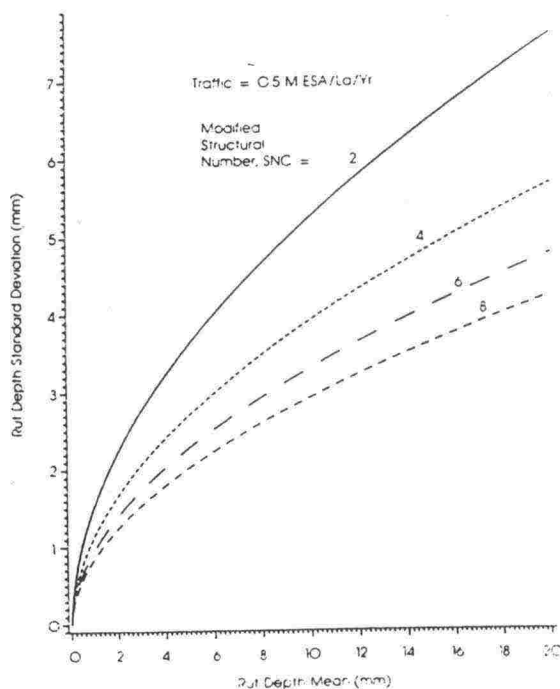
Urautuminen hidastuu hieman suuretessaan ja sademäärällä ja vaurioitumisella on lievä vaikutus siihen. Urautuminen johtuu pääasiassa deformaatiosta ja mallin antama urautumisnopeus on liian pieni Suomen olosuhteisiin verrattuna.

Uran keskihajonta vaikuttaa paljon tasaisuuteen ja on riippuvainen keskimääräisestä urasyvyydestä.

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty edellä olevat funktiot.



Kuva 3. Keskimääräinen urautuminen vilkasliikenteisellä ja vähäliikenteisellä tiellä.



Kuva 4. Urautumisen keskihajonta urasyvyyden ja rakenteen (modified structural number, MSN) mukaan.



## TASAISUUS

Tasaisuuden kehittymistä ennustetaan kolmen komponentin avulla:

- rakenteen rappeutumisen suhde tasaisuuteen, kuormituskertalukuun ja "structural number:iin"
- pinnan kunnon suhde vaurioitumisnopeuteen ja urautumisen keskihajontaan
- iästä ja alueesta riippuvainen tekijä.

$$TAS = 13 K [ 134 e^{(SNCK+1) \cdot -5.0} KKL + 0.114(Umuutos) + 0.0066Vaurala + 0.42Reikäala ] + K \cdot 0.023LTAS \quad (4)$$

missä

K = olosuhde kerroin

SNCK = "modified structural number", joka on korjattu päällysteen vaurioiden mukaan

KKL = kuormituskertaluku, 80 kN standardiakseleita

Umuutos = urasyvyyden hajonnan muutos vuodessa

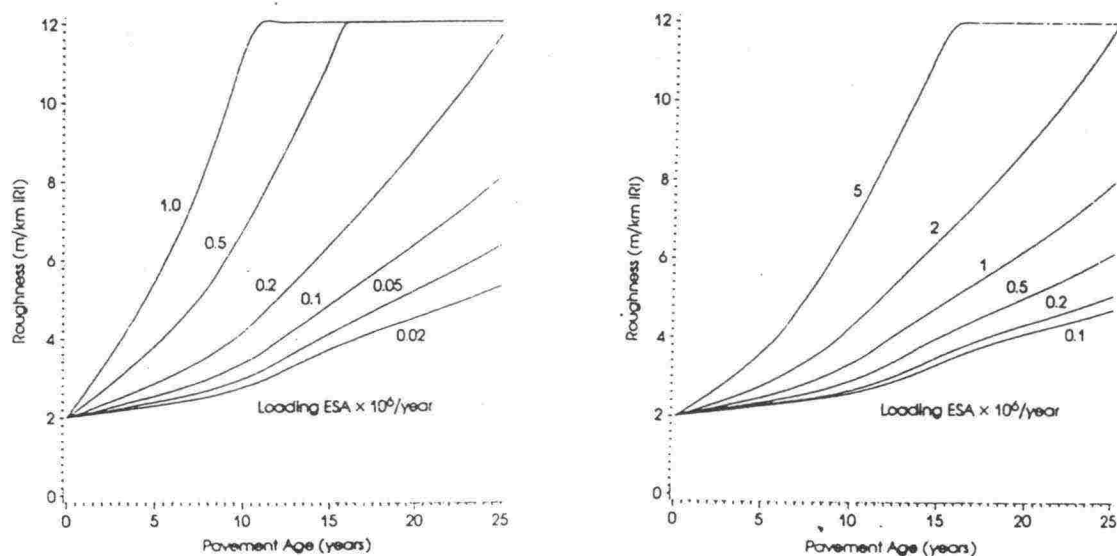
Vaurala = vaurioituneen pinta-alan muutos vuodessa

Reikäala = reikien lisääntyminen

LTAS = ko. kohteen lähtötasaisuus korjattuna olosuhdekertoimella

Kuvassa 5 on esitetty tasaisuuden kehittyminen.

Asphalt Concrete Modified Structural Number 3 Asphalt Concrete Modified Structural Number 5



Kuva 5. Epätasaisuuden kehittyminen päällysteen iän ja liikennemäärän (ESAL) mukaan.

## 1.2 TRRL 883, Transport and Road Research Laboratory, England

C.K.Kennedy & N.W.Lister

Prediction of pavement performance and design of overlays

Transport and Road Research Laboratory report 833, Crowthorne, Berkshire, 1978.

Suunnittelumenetelmä perustuu lähes kokonaan englantilaisella "deflection beamilla" (dynaaminen kantavuuden mittauslaite) tehtyihin kantavuuden mittauksiin. Vaurioitumista ja uria luokitellaan kantavuuden mukaan eri luokkiin siten, että paljon vaurioita -> huono kantavuusluokka.

Periaatteena on, että vaurioiden ilmestyttyä pintaan, tie on jo vaurioitunut liian pitkälle. Tällöin ei voida käyttää täysimääräisesti hyväksi AB kerroksen vahvistavaa vaikutusta.

Seuraavan kaavion avulla määritetään päällysteen jäljellä oleva elinikä:

1. Määritetään kuormituskertaluku (KKL) eli liikenteen rakennetta rasittava kuormitus tarkasteluhetkeen asti.
2. Valitaan kohteen kantavuuden taipuma pystyakselilta.
3. Rakenteen "Critical Condition" (odotettavissa oleva kestoikä, kriittinen kuormitus) valitaan jollain todennäköisyystasolla (0.25, 0.5, 0.75, 0.9).
4. KKL:n ja kriittistä kuormitusta osoittavan käyrän väliin jää arvioitu jäljellä oleva kestoikä kuormituskertalukuina.

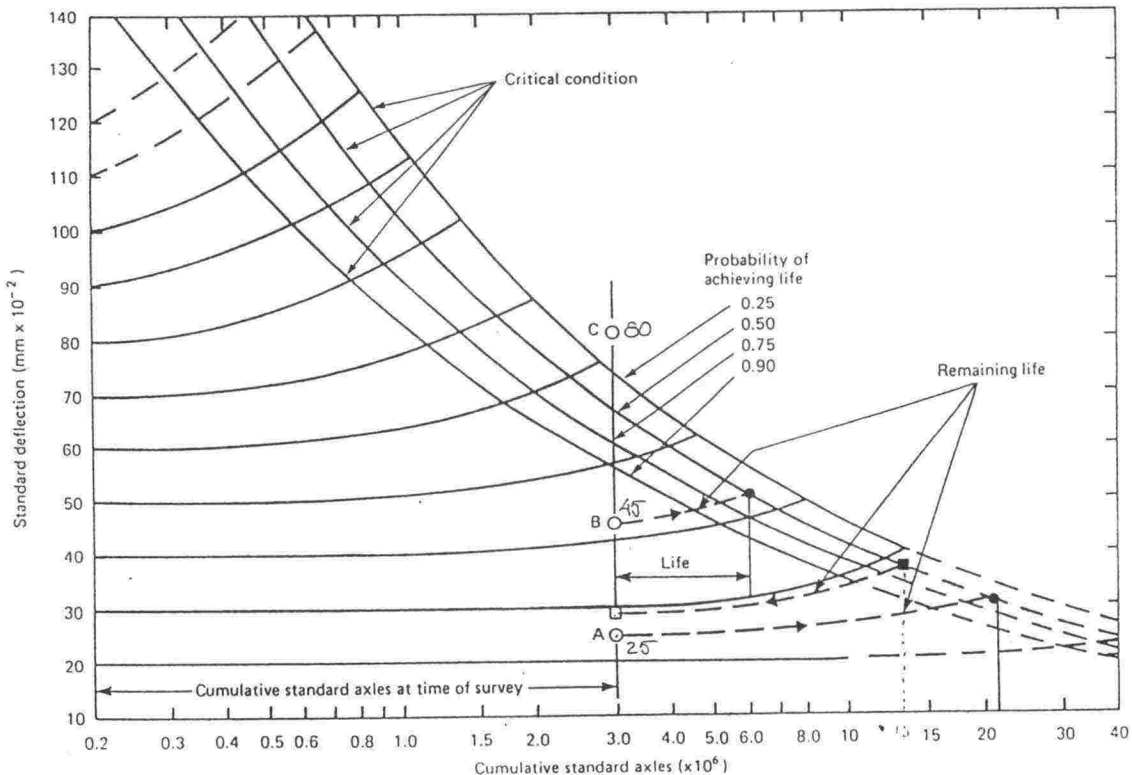


Fig. 22 RELATION BETWEEN STANDARD DEFLECTION AND LIFE FOR PAVEMENTS WITH GRANULAR ROAD BASES WHOSE AGGREGATES EXHIBIT A NATURAL CEMENTING ACTION - DESIGN EXAMPLE

Kuva 6. Tien rakenteen jäljellä olevan kuormituskestävyyden arviointitaulukko.

### 1.3 VTT:n tutkimuksia 1985 ja 1988

VTT tiedotteita 429: Teiden kunto ja palvelutaso, Tutkimustulokset havaintoteiltä 1979-1983, H. Saarinen ja H. Jämsä, Espoo 1985

Havaintotieverkko perustettiin 1979. Siihen kuuluu 45 tietä, joista 27 on AB-teitä ja 18 ÖS-teitä. Uudenmaan piiristä siihen kuuluu 12 + 2 tietä, Hämeestä 6 + 6, Oulusta 4 + 6, Keski-Suomesta 2 + 3 ja Vaasasta 3 + 1 tietä. Asfalttipäällysteisiä teitä on yhteensä 81 km ja ÖS-teitä 51 km. Vaurioinventointeja on tehty suhteellisen säännöllisesti. Vauriosumma (VS) lasketaan seuraavalla sivulla esitettyjen painokertoimien avulla. VS ilmoittaa kuinka paljon vaurioita on neliömetreinä tutkittavan kohteen sataa metriä kohden.

Havaintoteiden mittaustuloksien perusteella AB-teillä oli havaittavissa kaksi erilaista vauriokehitystä, jonka perusteella teitä kutsutaan hyviksi tai huonoiksi AB-teiksi. Vaurioiden lisääntyminen noudattaa tämän tutkimuksen mukaan toisen asteen yhtälöä

$$y = ax^2 \quad \text{missä}$$

y	= vauriosumma
a	= vaurioitumisnopeutta kuvaava vakiotermi
x	= viimeisen päällysteen ikä (vuosi)

Huonojen teiden vaurioituminen on noin kolme kertaa nopeampaa kuin hyvillä AB-teillä.

Tien vaurioitumista selittivät parhaiten päällysteen ikä, tien kevätkantavuuden ja tavoitekantavuuden suhde sekä tien leveys. Pientareen leveys, uran syvyys, KKL, KVL/kevyt/raskas eivät parantaneet selityssastetta.

Hyvien teiden malli on ( $r^2 = 0.63$ ,  $n=83$ ):

$$VS = 22.1 + 0.14 \cdot I^2 - 7.49 \frac{E_{MIT}}{E_{TAV}} - 1.25 L$$

VS	= vauriosumma
I	= viimeisen päällysteen ikä
$E_{MIT}$	= tien mitattu kevätkantavuus
$E_{TAV}$	= tien tavoitekantavuus
L	= tien leveys

Öljysorateiden vaurioitumismalli on samanlainen, vaurioituminen on vain nopeampaa.



VTT tutkimusselostus 689: Havaintotieaineistosta 1979 - 1987 laskettuja vaurioitumismalleja, H. Jämsä, Espoo 1988

Aineistoa homogenisoitiin vauriosumman, maaston, mittaustulosten ym. suhteen 100 metriä pidemmiksi kokonaisuuksiksi. Tietueiden määrä laski näin 810:stä 65:een AB-teillä ja 512:sta 38:aan ÖS-teillä. Aineistosta poistettiin ne tietueet, joiden vauriosumma pieneni ilman toimenpidettä.

Aikaisemmin käytetty lineaarinen regressiomalli osoittautui vertailuissa huonommaksi kuin valittu epälineaarinen, eksponentiaalinen malli:

$$VS = 144 * I^{1.29} * e^K \quad \text{missä}$$

$$K = -4.31 * 10^{-3} * E + 0.01 * T - 0.56 * L + 8.6 * 10^{-5} * KVL$$

VS	= korjattu vauriosumma (m <sup>2</sup> /100m)
I	= päällysteen ikä
E	= tien mitattu kevätkantavuus (MN/m <sup>2</sup> )
T	= tasaisuus (cm/km)
L	= tien leveys (m)
KVL	= tien keskim. liikennemäärä

Mallin selitysaste on 60 %, n=427, vastaavan öljysoramallin selitysaste on 53 %, n = 239. Öljysorateille saatiin malli:

$$VS = 996 * I^{1.41} * e^K \quad \text{missä}$$

$$K = -0.015 * E - 0.52 * L + 4.92 * 10^{-5} * KKL$$

VS	= vauriosumma
I	= päällysteen ikä
E	= tien mitattu kevätkantavuus
L	= tien leveys
KKL	= tien vuosittainen kuormituskertaluku

Vauriosumman eri tekijöiden painokertoimet:

Vauriotyyppi	Haittakerroin
Poikkihalkeamat	0.1
Pituushalkeamat	0.5
Keskisaumahalkeamat	0.1
Muut halkeamat	0.5
Verkkohalkeamat	1.0
Paikkaukset	1.0
Reiät ja purkaumat	1.0



## 1.4 SASKATCHEWAN PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM

P.Bein, J.B.Cox...

Application of HDM3 pavement deterioration model in Saskatchewan Pavement Management Information System, 68th Annual meeting of TRB, Washington, USA 1989

Kanadan Saskatchewan tielaitoksen hoidossa on yhteensä noin 20 000 km päällystettäviä teitä. Teiden tasaisuuden parantamiseen halutaan kiinnittää erityistä huomiota. Tämän vuoksi tehtiin tasaisuuden ja urautumisen malleja laitoksen PMS-järjestelmän avuksi. Vaurioinventointiaineistoa ei ollut, joten vauriomalleja ei voitu kalibroida Kanadalaisiin olosuhteisiin.

Työn perustaksi otettiin HDM3 malli, koska tienkäyttäjien kustannukset ovat oleellinen osa tienpitoa ja tasaisuuden optimoimista. Muita perustapoja päällystettyjen teiden tasaisuuden ennustamiseksi on:

1. Oletetaan tasaisuus vain liikennemäärän funktioksi.
2. Oletetaan tasaisuus vain ajan funktioksi. Tällöin ei välitetä vaurioiden, halkeamien ja reikien epäsäännöllisestä esiintymisestä. Samoin kunnossapitotoimenpiteiden rappeutumista hidastava vaikutus jää vähälle huomiolle.
3. Kolmas tyyppi, jota myös HDM3-malli edustaa, olettaa tasaisuuden riippuvan sekä rakenteesta että iän ja ympäristön vaikutuksesta.

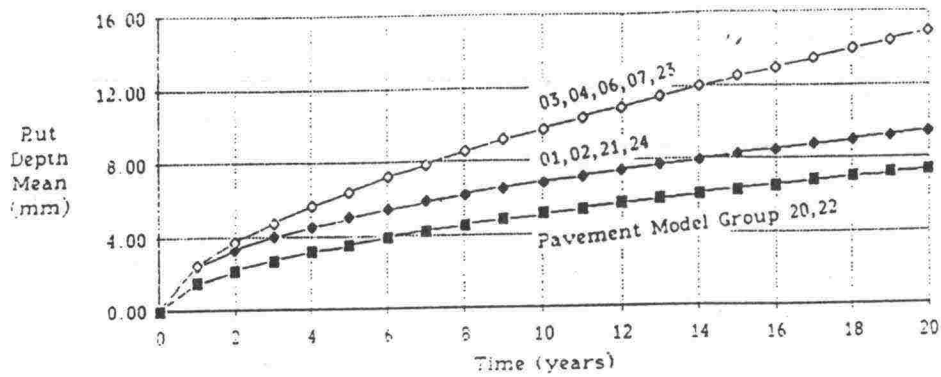
Kalibroinnissa Saskatchewanissa tierakenteet luokiteltiin 11 eri luokkaan, HDMn mukainen "Modified Structural Number" laskettiin, alue jaettiin 4 ilmastovyöhykkeeseen (kuva 7), pohjamaan tyyppi arvioitiin ja kunnossapitotoimenpiteet kerättiin.

URAMALLIA kalibroitaessa osoittautui, että päällysteen ikä oli merkittävin muuttuja, koska kuormituskertaluku ja "Modified Structural Number" korreloivat hyvin voimakkaasti iän kanssa. Malli tehtiin erikseen eri rakennetyypeille ja osoittaa, että ohuet rakenteet urautuvat nopeammin kuin paksut (Kuva 8).

TASAISUUMALLISSA ympäristön vaikutus osoittautui Kanadassa tärkeimmäksi tekijäksi. Halkeamat ja reiät eivät vaikuta tasaisuuden kehitykseen, koska Saskatchewanissa kunnossapitotoimenpiteet estävät näiden vaurioiden kehittymisen niin pitkälle, että ne vaikuttaisivat tasaisuuteen. Koska tiet ovat jäässä puoli vuotta, kuormituskertaluku jaettiin kahdella. Malleissa epätasaisuus lisääntyy ajan suhteen, mutta kovemmissa ilmasto-olosuhteissa rappeutuminen kiihtyy (Kuvat 9a,b&c).

Predominant Soil Type	Climate Zone			
	A Brown	B Dark Brown	C Black	D Forest
Mean Annual Snowfall (mm)	900	1050	1150	1270
Mean Annual Rainfall (mm)	300	340	380	410
Thorncwaite Moisture Index	-20	-15	-10	-10
Mean January Daily Temp. (°C)	-12	-17.5	-20	-22.5
Mean July Daily Temp. (°C)	18.5	17.5	16.5	15.5
Mean Annual Frost Free Days	100	90	80	70
Mean Annual Hours of Sunshine	1300	1300	1250	1200

Kuva 7. Saskatchewanin ilmastovyöhykkeiden tunnuslukuja.



Kuva 8. Keskimääräinen urautuminen ajan ja päällystetyypin mukaan.

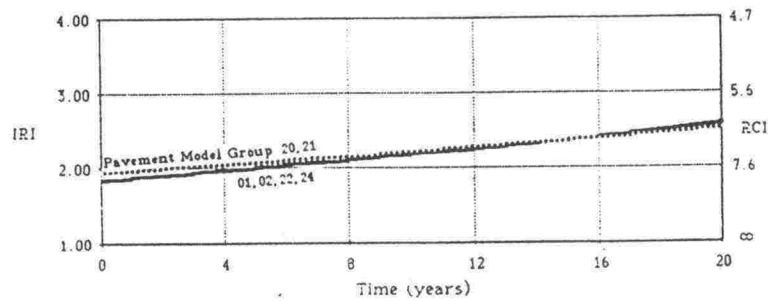


FIGURE 6. ROUGHNESS PROGRESSION IN CLIMATE ZONES A AND B

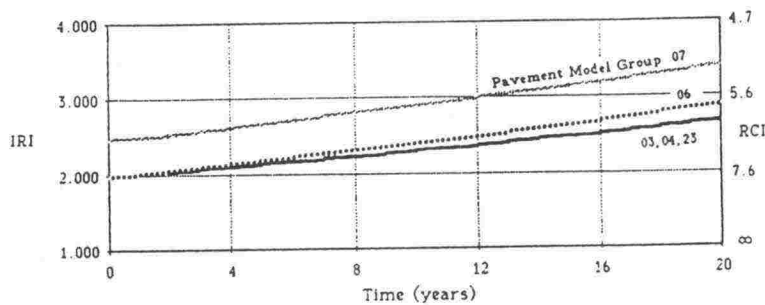
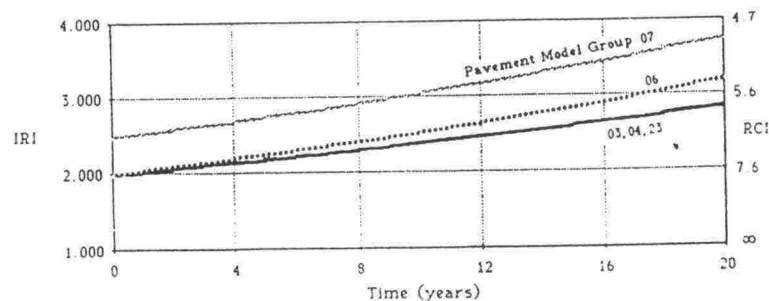


FIGURE 7. ROUGHNESS PROGRESSION IN CLIMATE ZONES C AND D.



Kuvat 9 a,b&c. Epätasaisuuden lisääntyminen eri ilmastovyöhykkeillä.

## 1.5 STRUCTURAL MAINTENANCE ASSESSMENT AND PERFORMANCE ON MINOR ROADS IN KENT, ENGLAND

J.R.Duffell, A.Kalombaris: Structural maintenance assessment and performance of minor roads, Proceeding 18 th Summer Annual Meeting of PTRC, Sussex, England 1990

Hatfieldin Polytechnica tutki 1988-1991 kolmen vuoden ajan vähäliikenteisten teiden vaurioitumista. Tutkimus kohdistettiin lievästi vaurioituneisiin teihin, joiden kunnon kehitystä seurattiin puolen vuoden välein. Valittuja kohteita oli 74 kpl, yhteensä 600 km<sup>2</sup>

Mittalaitteina käytettiin englantilaisten High Speed Road Monitoria (HRM), pudotuspainolaitetta, silmämääräistä vaurioinventointia ja tien olosuhteiden inventointia (kuivatus, rakennekerrokset, pientareet...).

Tärkeimmät vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät olivat: tien leveys, **liikennemäärä**, kuivatus, pientareiden kantavuus ja **tien rakenne**.

Sidottujen kerrosten paksuus vaihteli pohjamaan laadun mukaan. Myös lisääntynyt liikennemäärä lisäsi sidottujen kerrosten paksuutta.

Pudotuspainomittaustuloksissa ei tarkasteluaikana tapahtunut merkittäviä muutoksia. Muutamissa kohdin kantavuus oli pienentynyt, mutta tällöin tie oli myös pahoin vaurioitunut.

Raskaan liikenteen osuus päällysteen vaurioitumiseen oli erittäin suuri varsinkin heikoilla päällysteillä.

Vaurioitumisen varianssista pystyttiin selittämään 71 % tien reunakantavuudella ja reikiintymisellä.

## 1.6 OULUN YLIOPISTO 1988-1991

Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja:

E.Ehrola, Asfalttipäällysteiden poikittaishalkeilu matalissa lämpötiloissa ja siihen vaikuttavat tekijät, julkaisu 4, Oulu 1988

J.Alenowicz, R.Kekäläinen, E.Eerola, Minimizing reflection and frost heave crackings in flexible and semi-rigid road pavements, julkaisu 5, Oulu 1990

Josef Judycki, Fatigue of asphalt mixes, julkaisu 11, Oulu 1991

Poikkihalkeamat syntyvät ohuina hiushalkeamina, mutta kasvavat vuosi vuodelta suuremmiksi ja ovat yleensä ennen uudelleen päällystämistä 20...30 mm leveitä.

Tärkeimmät poikkihalkeamien syntyyn vaikuttavat tekijät ovat päällysteen jäykkyys ja ilmastolosuhteet.

Ilmaston vaikutusta päällysteen poikkihalkeamien syntyyn tutkittiin päällysteen iän avulla lasketun pakkasmääräsumman ja vuotuisen maksimipakkasmäärän avulla. Pakkasmääräsumman kasvaessa 5000:sta 15 000 vrk°C lisääntyy halkeamatiheys 2,5 kertaiseksi. Vuotuisen maksimipakkasmäärän noustessa 1000:sta 2000 vrk°C kasvaa halkeamatiheys 4,5 kertaiseksi.

Kun tierakenteessa esiintyy roudasta tai lämpöliikkeestä aiheutuvia muodonmuutoksia, tiehen



kohdistuvat rasitukset/jännitykset muuttuvat suunnitellusta. Päällysteen alapinnalla on pyöräkuorman aiheuttama suurin vetojännitys, joka on yhdensuuntainen poikittaisen halkeaman kanssa. Halkeilleelle päällysteelle aiheutuneet jännitykset ovat suurempia kuin ehjälle päällysteelle. Väsymisestä aiheutuva päällysteen hajoaminen alkaa poikittaisista hiushalkeamista, jotka kehittyvät pyöränurissa esiintyviksi pituushalkeamiksi. Karkean arvion mukaan halkeilleeseen tiehen kohdistuvat jännitykset ovat 50 % suurempia kuin ehjän tien kuormitus eli roudan aiheuttamat muodonmuutokset lyhentävät merkittävästi tien kestoikää.

Pitkittäishalkeamien alkua voidaan Molenaarin (A.A.A. Molenaar, Fatigue and deflection cracking due to traffic loads, Proceeding of AAPT, Vol 53 (1984), p.440-474.) mukaan ennustaa pinnan taipumasta jäykälle rakenteelle:

$$SCI = d_0 - d_{500} \quad = \text{Surface curvature index,} \\ \text{pinnan taipumaindeksi}$$

missä  $d_0$  = maksimitaipuma  
 $d_{500}$  = taipuma 500 mm etäisyydeltä

Pitkittäishalkeamia alkaa syntyä päällysteen pinnalle kun  $SCI < 100 \cdot 10^{-6}$  m.

## 2. ASIAANTUNTIJAHAASTATTELUT: RAPPEUTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT SUOMESSA

### 2.1 YLEISTÄ

Vaurioitumista ilmiönä haluttiin tutkia tämän työn yhteydessä kirjallisuuden lisäksi asiantuntijahaastatteluin. Tässä yhteydessä haluamme kiittää heitä saamastamme avusta. Haastateltuja henkilöt olivat: R.Orama TIEH/Geo, K.Lehtonen TIEH/Stk, H.Jämsä VTT, P.Toiviainen TIEL/Oulu ja J.Belt Oulun yliopisto/Tie- ja liikennelab.

Haastateltavien kanssa käytiin läpi seuraavat kysymykset/aiheet urautumisen, vaurioitumisen ja epätasaisuuden kannalta:

1. Mitkä muuttujat vaikuttavat vaurioitumisnopeuteen ?
2. Millainen on vaurioitumisfunktion muoto ?
3. Mitä tietolähteitä suosittelet työlle ?
4. Miten tarkasteltavan kohteen pituus vaikuttaa ennustamiseen ?
5. Käsityksesi mittausdatan hyvydestä ?
6. Mikä on edellisen toimenpiteen vaikutus vauriokehitykseen ?

Seuraavissa luvuissa esitetään yhteenveto tuloksista.



## 2.2 VAURIOT

Teiden vaurioitumisen perusteet ovat riippuvaisia pohjamaasta ja tien rakennetyypistä. Pohjamaalajeja on noin 10 erilaista ja niiden ominaisuudet muuttuvat maaperän kosteuden mukaan, rakennetyyppejä on edelleen useita. Periaatteessa tien rakenteen tilaa voi ryhmitellä tienumeron perusteella (valtateiden rakenne <-> paikallisteiden kerrokset), liikennemäärän, toiminnallisen luokan tai jonkin muun yleisen tienpitoa ohjaavan tekijän mukaan.

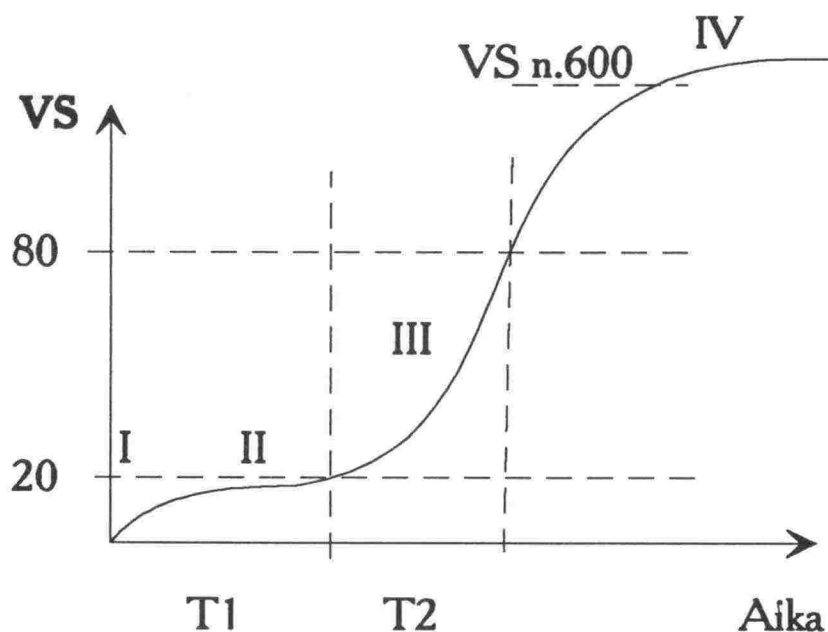
Vaurioitumista tulee tarkastella kaksijakoisena: väsymiseen liittyvät vauriot ja roudan/ muodonmuutosten aiheuttamat vauriot. Tällöin vaikuttavat tekijät ovat: rakenne, KVL ja ulkoiset olosuhteet.

Vauriosumma (VS) on indeksi eri syiden aiheuttamista vaurioista. Se alkaa kasvaa kun tien rakenteelliset vauriot alkavat. Periaatteessa olisikin hyödyllistä ennustaa ikää, milloin vauriosumman kasvu alkaa.

Vaurioituminen tapahtuu epälineaarisesti ja periaatteessa neljässä vaiheessa (kuvassa 10).

- Ensimmäisessä vaiheessa 1-4 vuoden kuluessa ilmaantuvat vanhan päällysteen aiheuttamat heijastusvauriot eli epätasaisten routanousujen aiheuttamat entisen päällysteen halkeamat ilmaantuvat uuteenkin päällysteeseen.
- Toisessa vaiheessa vaurioituminen tasaantuu, kunnes tien rakenne ei enää kestä kuormitusta (liikenteen aiheuttamaa taivutusta).
- Kolmannessa vaiheessa tie vaurioituu nopeasti, koska rakenne ei enää kestä liikenteen kuormitusta.
- Neljännessä vaiheessa vaurioitumisen lisääntyminen taas pienenee, koska tie on täysin vaurioitunut eikä sille enää "mahdu" uusia vaurioita.

Tätä vaurioitumista esitetään usein S-käyrän avulla kuten kuvassa 10. Toimenpiteiden suunnittelun kannalta oleellinen vaurioitumisaste on merkity kuvaan, esim. AB-teille alueelle 20-80 m<sup>2</sup>. Tällöin S-käyrän vaiheesta 0-20 m<sup>2</sup> tarvitsisi ennustaa vain sen kesto. Vastaavasti



Kuva 10. Esimerkki vaurioitumisen eri vaiheista ja kunnossapidon kannalta oleellisesta III alueesta VS 20 - 80/120 m<sup>2</sup>.

käyrän loppuosan kehittyminen ei liene oleellista, eli löytyykö tieltä 300 vai 500 m<sup>2</sup> vaurioita. Kuten edellä todettiin, vauriosumma on indeksi tietyistä vauriotyypeistä. Sen eri osatekijät painokertoimineen ovat TIEH nykyisin käyttämässä muodossa:

- pituushalkeamat	0.5
- poikkihalkeamat	0.5
- saumahalkeamat	0.1
- verkkohalkeamat	1.0
- paikat, reiät ja purkaumat	1.0

Esim. SHRP tutkimuksessa pyritään ennustamaan erikseen kunkin vauriotyyppin ikäkäyttäytymistä. Näiden osatekijöiden syntyyn vaikuttaa erilaiset tekijät, joita esitetään seuraavassa.

- Yleisin syy pitkittäishalkeamiin on alla olevat rakenteet, jotka liikkuvat toisin kuin päälle rakennetut, uudet rakenteet (pitkittäishalkeamat = routaongelma).
- Yleensä verkkohalkeamat aiheutuvat ylimmän sitomattoman kerroksen menettäessä kuormituskeston. Tällöin verkkohalkeamat "puhkeavat" näkyviin ja VS saattaa "räjähtää käsiin". Verkkohalkeamat havainnoidaan erikseen, jolloin etsitään kantavuuspuutteita. Tie, missä on 100-150 m<sup>2</sup> vaurioita, tulee korjata mahdollisimman nopeasti, jos halutaan käyttää hyödyksi tiessä olemassaolevia rakenteita. Vaurioitumisen alku on oleellinen, 4 m<sup>2</sup>- 10 m<sup>2</sup> vauriomäärät ovat pieniä ja mittaustarkkuudenkin vuoksi vähämerkityksisiä. Poikkeavia mittaustuloksia on tarkkailtava ja korjattava.
- Kaikkien rakennekerrosten, myös sitomattomien, kutistuminen aiheuttaa poikkihalkeamia. Näiden halkeamien kasvunopeus on vakio ja riippuvat ko. tiekohdan olosuhteista, mihin vaikuttaa: pohjavesi -> routa -> kerrosten pehmeneminen -> muodonmuutokset.
- Roudan aiheuttamat epätasaiset muodonmuutokset tuovat heijastehalkeamat (pääosa pituus- ja poikkihalkeamista) heti näkyviin.

Tien halkeilu pysyy kohtuullisen vakiona, jos tielle ei tule verkkohalkeamia. Ensimmäisten verkkohalkeamien ilmestyttyä vaurioituminen kiihtyy merkittävästi. Tien kunto putoaa nopeasti eri vaurioiden yhteisvaikutuksen vuoksi. Jos tie vaurioituu nopeasti, rakenne ei vastaa kuormituskestotavoitettaankaan.

### TIERAKENNE

Maasto-olosuhteet määräävät tierakenteiden käyttäytymistä. Taloudellinen tienteko ei pysty poistamaan kaikkia pohjamaan aiheuttamia haittoja. Esim. savikoilla ei ole routaheittoja, mutta kallioalueella niitä tulee, rajakohdista puhumattakaan.

Maanmuotokarttojen hyödyntäminen yhdessä tierekisterin kanssa olisi yksi tavoiteltavia kehityshankkeita. Samoin rakentamisen aikaisen pohjarakennustiedon saaminen kunnossapitäjän käyttöön olisi hyödyllistä: rakentamisen aikaiset kairaukset/vesiolosuhteet/louhepenkereet tulisi olla kunnossapitäjänkin tiedossa esim. kaapelitöiden vuoksi. Olemassaolevia teitä uudelleen rakennettaessa tulisi kuntotiedot olla saatavilla toimenpiteitä suunniteltaessa.



Suomen olosuhteissa tien rakennetyyppi vaihtelee hyvin tiheään. Yhdeltä tieltä tiedetään harvoin rakenteesta tarpeeksi, jotta tien kuntoa voitaisiin sen perusteella ennustaa.

Pintakunnon perusteet löytyvät tien rakennetyypistä. Seuraavassa on lueteltu neljä eri rakennetyyppiä, joiden voitaisiin olettaa määräävän tien ikäkäyttäytymisominaisuuksia:

1. Uusi tie, alusta mursketta tai vanhat tierakenteet purettu
2. Parannettu tie, alusta mursketta, vanha tie murskeen alla, ohut päällyste
3. Parannettu tai vaiherakennettu tie, alusta ehjä AB (BS/ÖS), useita sidottuja kerroksia
4. Parannettu tai vaiherakennettu tie, alusta vaurioitunut AB (ÖS/BS).

Vaurioitumisnopeutta voidaan käyttää myös toimenpidevalinnan perusteena. Peruskorjattava kohde voidaan mitoittaa vain vaurioitumisnopeuden mukaan. Toimenpiteiden raskausaste muuttaa merkittävästi tien vaurioitumiskäyttäytymistä. Pituus- ja saumahalkeamien vaikutus oletetaan pieneksi. Toimenpiteen syyksi ei riitä pelkästään huono kantavuus, tarvitaan lisäksi vaurioita.

Tierekisterin kantavuusmittauksiin ei luoteta niiden harvalukuisuuden vuoksi. Tallennettu tieto kuvaa piirin tiestön tilaa, mutta ei riittävällä tarkkuudella yksittäisen tieosan tilaa.

Jotta toimenpide muuttaisi vaurioitumisen nopeutta, sen pitää parantaa rakennetta. Hyvät tp:t ja huolelliset työtavat hidastuttavat tai korjaavat vaurioitumisen. Kantavuustaso määrää toimenpiteen onnistumisen. Rakenteessa oleva vika lyhentää paksuimpienkin päällysteiden ikää. Toimenpiteiden kirjaamisen vaihteleva käytäntö vaikeuttaa niiden vaikutuksen arvioimista.

Oikein ja kunnolla suunniteltu rakenne kestää hyvin ilmaston ja liikenteen aiheuttamat kuormitukset. Vaiherakentaminen sotkee suunnitellun rakenteen lujuuden pahasti ja siitä tuleekin luopua kokonaan. Aika ensimmäiseen vaurioon on yleensä pitkä, ellei rakentamiseen liity laatuvirheitä.

## KANTAVUUS

Suurin osa vaurioista syntyy keväällä, joten kevätkantavuutta tulee pitää mitoituksen perusteena. Kevätkantavuuskertoimet tulisi määrittää jatkuvien mittausten perusteella esim. vaurioinventoiijien toimesta. Nykyinen käytäntö ei tunnu oikein luotettavalta. Usein vaurioituvan tien pohjalla on vanha rakentamaton soratie, joka aiheuttaa routa- ja päällystevaurioita. Tällöin myös tien kantavuus (&kevätkantavuuskerroin) vaihtelee huomattavasti.

Pudotuspainolaite (PPL) mittauksien avulla voidaan arvostella tien rakenteen tilaa. Vähäliikenteisillä, huonosti rakennetuilla teillä, kantavuuden mittaukset antavat kuvan alustan tilasta. Rakennetuilla teillä rakenteen yläosa alkaa merkitä enemmän tien kestävyyyteen, sillä edellytyksellä, että kantavan kerroksen materiaalien laatu on hyvä.

## 2.3 TASAISUUS

Tasaisuuden kehitys on lineaarista siihen asti kunnes tien muut vauriot kiihdyttävät sen kehitystä. Epätasaisuutta aiheuttavina tärkeimpinä tekijöinä voidaan pitää geoteknisiä kysymyksiä, rakennekerroksien laatua, tien geometriaa, rakenteiden suhdetta kuormitukseen ja kevään sulamiskauden aikaisia vaurioita.

Tasaisuustulokseen vaikuttaa jonkin verran mittaushetki eli vuodenaika, mutta sen merkitys on vähäinen, varsinkin päätieverkolla. Tasaisuuden heitot syntyvät vaihtelevasti eri vuosina. Osa jää pysyväksi. Uusin tieto ei saisi syrjäyttää vanhempaa, vaan ainoastaan suurempi mitattu arvo lisää tietoa kohteesta. Tasaisuuden huononeminen on jatkuvasti nouseva käyrä. Etelä-Suomessa ei ole yleensä routaheittoja.

Painumat muuttuvat epätasaisuuksiksi alusrakenteiden epähomogeenisuuden vuoksi, sillä tasaisuus elää alusrakenteiden mukana. Mitä epätasaisempi tie on sitä suuremmat dynaamiset rasitukset kuormittavat tietä. Moninkertaistuneet dynaamiset kuormitukset lyhentävät huomattavasti tien kestoikää. Alempiluokkaisilla teillä paikkaus heikentää tasaisuutta ja lyhentää siis rakenteen ikää eli toimenpiteen valintaan tulee kiinnittää huomiota.

Tasaisuudelle ei ole vielä tehty luotettavaa mallia näin pohjoisille olosuhteille. Tasaisuudelle voidaan kehittää lähinnä trendi, jolle saadaan luokitellusta aineistosta kehikset.

## 2.4 URAT

Massatyypit ja tien poikkileikkaus määräävät urautumisen "kehityskaaren", KVL ja päällysteen ikä puolestaan urautumisnopeuden. Alle 9 m leveillä teillä urautumisen tärkeimmäksi syyksi tulee liikenteen tilalle tien leveys.

Alku-ura on noin 2-4 mm ja se elää lämpimällä säällä, esim. kuumennustasaus pehmentää syvältä, jolloin alku-urakin on suurempi. Ensimmäisen vuoden aikana tapahtuu rakenne- ja päällystetyypistä aiheutuva deformaatio, jota mm. ASTO tutkimuksessa on määritetty. Näiden epähomogeenisten alkumuutosten jälkeen urautuminen on pikkuhiljaa kiihtyvää.

Vanhojen mittausten avulla saadaan varsin hyviä ennustemalleja urautumiselle. Malliin vaikuttavia tekijöitä ovat ikä/KVL + toimenpiteet. Uratuloksia voi huoletta kasvattaa vanhojen mittausten erotusten perusteella kun tarkastellaan vain yhden osuuden mittauksia. Toimenpiteen jälkeisiin mittauksiin tulee suhtautua epäillen vuoden ajan (alkudeformaatio ei ole pysähtynyt). Mittaussuunta ja -leveys tulisi olla aina sama.

ÖS-teiden urautuminen on erilaista ja aiheutuu suurelta osin reunakantavuuden puutteesta. Tällöin tien rakenteelliset tekijät ja raskaan liikenteen kuormitus määräävät reuna- ja keskikantavuuden. Tien reunakantavuus alempiasteisilla teillä on vain 30 % tien keskikantavuudesta. Vasta 2 m päässä reunan taitepisteestä päästään 100 % kantavuuteen. Kevytpäällysteteiden urautumistilannetta kuvaa ns. "poikittainen tasaisuus" -muuttuja paremmin kuin kestopäällysteillä käytössä oleva "max ura" -muuttuja. Tässä tutkimuksessa ei tarkastella kevytpäällysteteiden urautumista. Myös KAB-päällysteiden urautumista tulee seurata erikseen.



## 2.5 MITTAUSTARKKUUS

**Uramittaus** riippuu jonkin verran mittausleveydestä, mutta muuten sen tarkkuus on hyvä. Palvelutasomittarin uramittauksessa on Oulussa todettu 2 mm tasoero oikolaudalla mitattuun tieosaan. PTM:n tulos oli "todellista" tilannetta pienempi. VTT:n PTM-mittarin tuloksissa saattaa olla eroja eri ohjelmistoversioiden takia.

Uramittauksen tarkkuus on  $\pm 2$  mm, mikä aiheutuu ajolinjoista ja epäjatkuvaista mittauksesta. Uramittauksen osalta tulisi harkita, onko urasyvyyden laskentatapa oikein (max ura on 100m matkalla mitattujen 4 x 5 uramaksimin keskiarvo). Negatiivisen uramuodon laskeminen em. keskiarvoon muuttaa saatavaa arvoa liikaa. Oleellista on **mittalaitteiden kalibrointi**.

**Tasaisuusmittaus** on erittäin hyvä. Hajonta voisi olla  $\pm 2\%$ , käytännössä IRI tulosten tulkin-  
nassa sallitaan  $\pm 0.1$  yksikön ero. PTM-mittaukset ovat kaikenkaikkiaan luotettavia mutta  
laitteiden kalibrointi tulee tehdä säännöllisesti.

**Vauriosumman (VS)** laatu vaihtelee, mikä tekee siitä epäluotettavan muuttujan. Vaurioinventoinnin tarkkuus huononee kun vauriomäärä suurenee, esim. ÖS-teillä VS ylittäessä 100 m<sup>2</sup> alkaa tarkkuus kärsiä. Kun vaurioiden määrä tulee 150 m<sup>2</sup> paikkeille, laskentatapahtuma muutetaan pinta-alan arvioinniksi, jolloin seurataan enää neljää muuttujaa. VS:n mittaustarkkuus lieenee  $\pm 20\%$  ja se on hyvin riippuvainen mittaustilanteesta. Vaurioituminen ei saa parantua mittaustuloksen vaikutuksesta eli epäilyttävät mittaustulokset tulee poistaa ja käyttää uusinta tietoa.

Vauriosumman yksikkö m<sup>2</sup> vaatii paljon mittaustyötä, toinen vaihtoehto olisi käyttää pelkkää vaurioitunutta pituutta. Erään mielipiteen mukaan: "Tarkkaa vaurioinventointia voidaan tehdä vain kävelemällä. Nykyisellä hitaasti autosta tehtävällä inventoinnilla huomataan noin kolmasosa vaurioista, palvelutasomittarilla saadaan kerättyä vain noin kymmenesosa vaurioista kävelemiseen verrattuna. Mittausolosuhteet vaikuttavat paljon havaittavien vaurioiden määrään (auriongonpaiste, kosteus, liikenteen häiritsevä vaikutus). VS on aina riippuvainen mittajaasta".

## MITTAUSPITUUS

100 m aineistoon vaikuttavat mittauksen epävarmuustekijät paljon, pitempi tarkastelujakso tasaa näitä mittauspuutteita. Mittausten pituusmittauskin saataa aiheuttaa virheitä pitemmillä mittausjaksoilla eli 100 m eivät aina sovi kohdalleen. Tieräkisteriin merkityt tieosien pituudet ovat erilaisia kuin mittaustodellisuus. Mittauksen tulisikin tapahtua aina samaan, tieräkisterin kasvusuuntaan.

Kilometrin sisälle mahtuu jo mitä vain, koska olosuhteet ja maasto muuttuvat nopeasti (ja rakenne) eli mitä lyhyempää kohdetta tarkastellaan, sitä parempi. Ennustettavan jakson homogeenisuus on oleellisempaa kuin absoluuttinen pituus. 100 m voi olla liian pitkä tarkastelujakso, kun eri vauriotyypit sekoittuvat rakenteellisen epähomogeenisuuden vuoksi. Kaikkien mittaustulosten arvoon vaikuttaa mittausajankohta enemmän tai vähemmän riippuen tien rakenteesta.

Kunnossapitotoimenpiteiden ja rakenteen parantamisten vaihteleva kirjauskäytäntö haittaa mittausdatan hyväksikäyttöä.

## 2.6 TIETOLÄHTEET

Kokemus suomalaisista olosuhteista on arvokkain lähde. Ulkomainen kirjallisuus, varsinkin amerikkalaiset tutkimukset keskittyvät liian paljon tiellä havaittujen vaurioiden, verkkohalkeamien mallintamiseen. Tuolloin ollaan jo liian myöhässä. Kun rakenne on jo verkkohalkeillut, vahinko on jo tapahtunut. Toimenpiteisiin on ryhdyttävä kun sidottujen kerrosten alapinnan kuormitukset tulevat liian isoiksi. USAn Mn/Road test on ensimmäinen yritys tähän suuntaan. Myös tutkimuksia ja niiden soveltamista käytäntöön ei tehdä tarpeeksi hyvin useissa tutkimuksissa.

Pudotuspainolaitteen (PPL) tuloksista voidaan laskea ylempien kerrosten kimmomodulien ( $E_s$ ) muutoksia. PPL:n kahden ensimmäisen geofonin tuloksista saadaan tunnusluku pinnan (alle 20 cm) modulille. Tästäkin on jo Suomessa hyvä kokemus. Muissa pohjoismaissa ollaan 10 v jäljessä. Pohjoismaista tienrakennusta on haitannut myös kunnollisen laadunvalvonnan ja siitä saatavan palautteen puuttuminen.

Vaurioitumista kuvaa parhaiten teiden luokittelu rakenteen mukaan. Ongelma on kuitenkin, että suurinta osaa nykyisistä teistä ei ole rakennettu minkään ohjeen/normin mukaan. TIEL sai 1964 normiston, joka tehtiin AASHOn tiekokeen pohjalta. Normiston suosittamat kerrospaksuudet ovat nykyisien ohjeiden mukaan hyväksyttäviä, joten -64 jälkeen normien mukaan rakennetut tiet täyttävät vaatimukset. Parannettujen teiden osalta tilanne ei ole näin hyvä.

Väsymiseen keskittyviä vauriomalleja on paljonkin olemassa, mutta mallit, joissa roudan vaikutus olisi tarpeeksi esillä ei ole tiedossa. Tavalliselta tieltä tehtyihin mittauksiin on yleensä vaikuttamassa niin monta tekijää, ettei hyviä tuloksia voi saavuttaa. Malleissa pitää olla mukana suomalainen talvi ja roudan vaikutus. Mitä suurempi routanousu, sitä enemmän se aiheuttaa vaurioita rakennekerroksille ja pintakunnolle. 50 mm routanousu alkaa aiheuttaa pitkittäishalkeamia.

1985 otettiin uudet mitoitusohjeet käyttöön ja vasta tällöin rakennekerrosten paksuudet tulivat oikealle tasolle. Edelleen niiden laatu määrää tien vaurioitumisen. Tietä ei saada hyväksi, jos suodatinhiekkalle asetettavat vaatimukset eivät ole tarpeeksi kovia, sillä paksuja suodatinhiekkakerroksia tarvitaan kuitenkin tehtäessä routamitoitusta. Pohjavettä ei kuitenkaan oteta tarpeeksi huomioon routamitoituksessa.

**SHRP tutkimus** USA:ssa tuottaa paljon tietoa myös Suomen olosuhteisiin. Suomessa on perustettu ja mitattu 1991 noin 50 kpl 500 "jalan" (152 m) SHRP referenssikohteita. 3-5-vuoden kuluttua on odotettavissa ensimmäisiä SHRP:n aineiston perusteella tehtyjä malleja.

**Havaintotieverkkoa** alettiin suunnitella 1977 ja 1979 tehtiin ensimmäiset mittaukset. Alussa sen hyväksikäyttö oli hapuilevaa, koska PMS:n tapaista suunnittelukäytäntöä ei vielä ollut olemassa. Suurin vika on ollut teiden valintakriteerien puuttuminen eli niitä ei ole valittu minkään koesuunnittelun perustaksi. Teitä ei kuitenkaan ole vaihdettu tai otettu lisää ohjelmaan. Teiltä kerätty data on hyvää siltä osin kuin sitä on olemassa. Aineisto soveltuu mallien verifiointiin, mutta sen sisältämä aineisto ei sovellu yleispätevien mallien tekemiseen, koska ko. otos ei ole yleispätevä. Havaintoteiltä määritettiin -91 rakennekerrosten laatua koekuoppien ja laboratoriokokeiden avulla. 1992 mitataan teiden rakenne PPL-laitteella ja maatumalla, jotta teiden rakenteen tila saadaan kuvattua hyvin. 1985 tehtiin havaintotieaineistosta kanadalaiseen OPAC-malliin perustuva tien palvelutasoennuste.



Norjassa on tehty "yhden ratkaisun" kohteita, joita on seurattu, Ruotsissa on mitattu ns. "Observationssträckor", mutta niiden aineistoa ei ole liiemmästi käytetty hyväksi.

Muulla tehtyjä tutkimuksia voi käyttää hyväksi lähinnä tarkasteltaessa mallien muotoa ja tarvittavia muuttujia. Tällöin tulee muistaa esim. Etelä-Amerikan hyvin erilaiset olosuhteet. Amerikassa tutkimukset perustuvat edelleenkin AASHOn koetien tuloksiin. Sen puutteita oli, että se tehtiin vain yhdessä paikassa ja nopeana tutkimuksena, jossa 5 vuoden kuormituskertalukua vastaava määrä ajettiin muutamassa kuukaudessa.

## 2.7 TOIMENPITEEN VAIKUTUS VAURIOITUMISEEN

Uusi päällyste määrittää uudelleen urakulumisen (+erikoispäällysteet). Urautumiseen vaikuttaa suoraan käytetty kiviaines ja laatan muut ominaisuudet.

Toimenpiteiden vaikutuksen arviointi vauriosummaan on vaikeaa, koska kyseessä on indeksi. Yksi mahdollisuus olisi erottaa kantavuusvaurioiden korjaaminen omaksi kokonaisuudekseen, jolloin tie parannetaan vastaamaan uutta rakennetta. Tällöin voidaan käyttää normaalia uuden tien rappeutumiskäyrää. Sidottujen kerrosten paksuntamisella on kuormituskestävyyttä lisäävä vaikutus. Yleisesti ottaen vaurioitumiskehitys hidastuu laatan avulla, vaikka heijastushalkeamat tulevatkin heti näkyviin ja verkkohalkeamat ovat poissa jonkin aikaa. Vasta kun vaurioiden syyt poistetaan, vaurioituminen hidastuu.

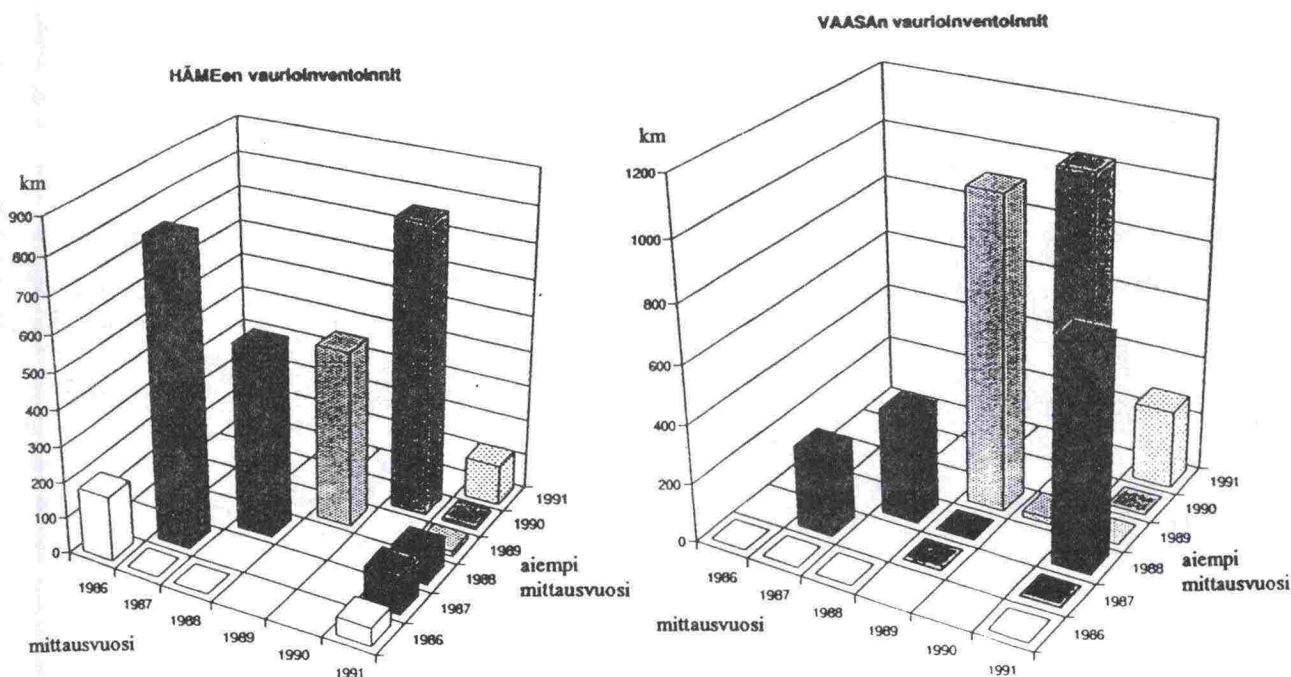
Päällystystoimenpide ei vaikuta vaurioitumisen ja tasaisuuden kehitykseen niin paljon kuin oletetaan, heijastevauriot tulevat kuitenkin läpi. Uudet toimenpiteet, stabiloinnit, muuttavat tien käyttäytymistä. Rakenteen parantaminen auttaa kun kyseessä on ollut huono pohjarakenne.

RP-kohteiden merkitseminen tierekisteriin tai muihin tietojärjestelmiin on hyvin epämääräistä ja vaihtelevaa ja tarvitsisi uudet yhtenäiset ohjeet.

### 3. KÄYTETTÄVISSÄ OLEVA AINEISTO

Tutkimuksessa käytettiin Hämeen ja Vaasan tiepiirien kuntotietoja. Vauriotietoja oli käytettävissä Hämeestä vuosilta 1986-1991 ja Vaasasta 1987-1991. Palvelutasomittausten tulokset olivat käytettävissä vuosilta 1990 ja 1991. Aineisto koottiin vuoden 1990 mittausten osalta keväällä 1991 ja vuoden 1991 mittausten osalta tammikuussa 1992. Aineistot luettiin PMS/tierekisteri-palvelutiedostosta SAS-tiedostoiksi ja yhdistettiin R. Olsosen tekemällä SAS-rutiinilla. Vuosien 1986-1989 vaurioinventointitiedot otettiin piirien tierekistereistä.

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty Hämeen ja Vaasan piirien vaurioinventoinnit vuosittain. Kuvista näkyy vuosittaiset mittausmäärät, sekä se minä vuonna ja kuinka paljon samoja 100 m:iä on mitattu aiemmin. Suurin osa ko. tiestöä on mitattu vain yhteen kertaan eli mittauspituutta osoittava tolppa on vain yhdessä ruudussa. Vaurioinventoinnit alkoivat vuosina 1986 ja 1987 eikä inventointi ole näin ollen vielä ehtinyt toiselle kierrokselle. Vaurioita mallinnettaessa käytössä oli kaksi inventointitulosta Vaasan piiristä 750 kilometritä (vuosilta 1988 ja 1991).



Kuvat 11 ja 12. Hämeen ja Vaasan vaurioinventoinnit eri vuosina.

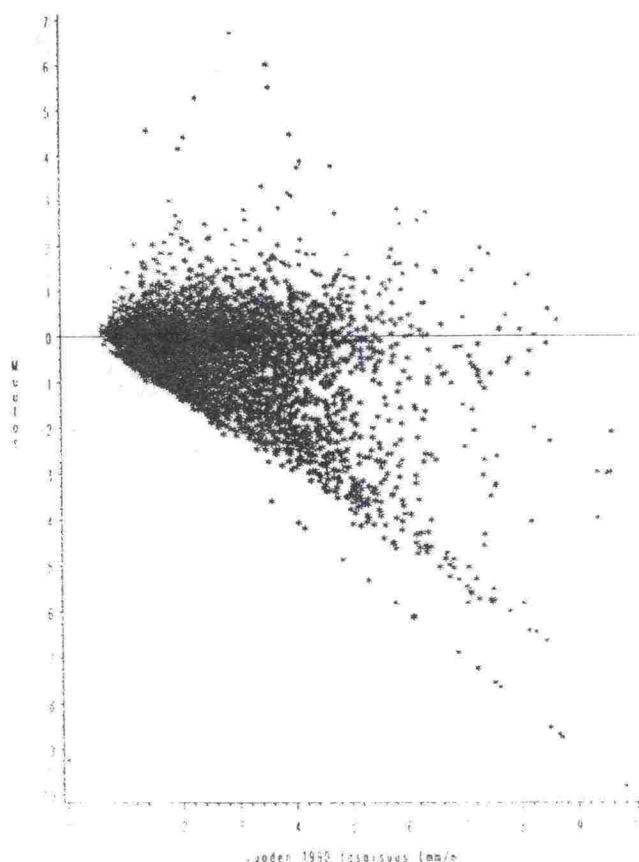


Tasaisuusmittauksia oli käytettävissä sekä Hämeestä että Vaasasta kahdelta vuodelta. Malleja tehtäessä käytettiin pääosin Hämeen tiestöltä saatua mittausaineistoa, jota oli n. 3200 km.

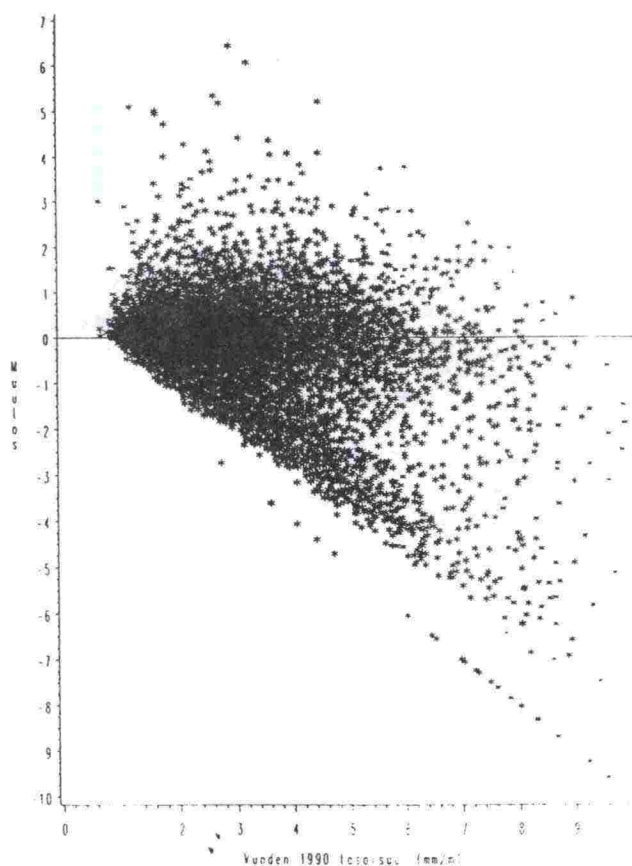
Uramittauksia oli käytettävissä samoin kuin tasaisuusmittauksia. Kuitenkin uran osalta ongelmana on mm. palvelutasomittarin ohjelmiston vaihtaminen (muutama kerta) kesällä 1990.

Kaikkien muuttujien osalta havaittiin, että varsin huomattava osa peräkkäisistä mittauksista tuottaa epäloogisia tuloksia vaikka osuudelta ei ollut olemassa rekistereihin kirjattua toimenpidetietoa. Malleja estimoitaessa tällaiset tapaukset pyrittiin pääosin poistamaan tarkasteluista. Kuvissa 13, 14 ja 15 on esitetty eri kuntomuuttujien kahden peräkkäisen mittauksen erotusta. Uran, tasaisuuden ja poikittaisen tasaisuuden osalta mittausten väli on ollut yksi vuosi ja vauriosumman osalta kolme vuotta. Työn kuluessa tuli esille useita seikkoja, joita tulisi ottaa huomioon kuntotietojen mittauksessa ja käsittelyssä, jotta tulokset olisivat parempia kuin nykytilanne. Seuraavissa on kuitenkin esitetty käytettävissä olevan aineiston lähtötila kuntomuuttujittain.

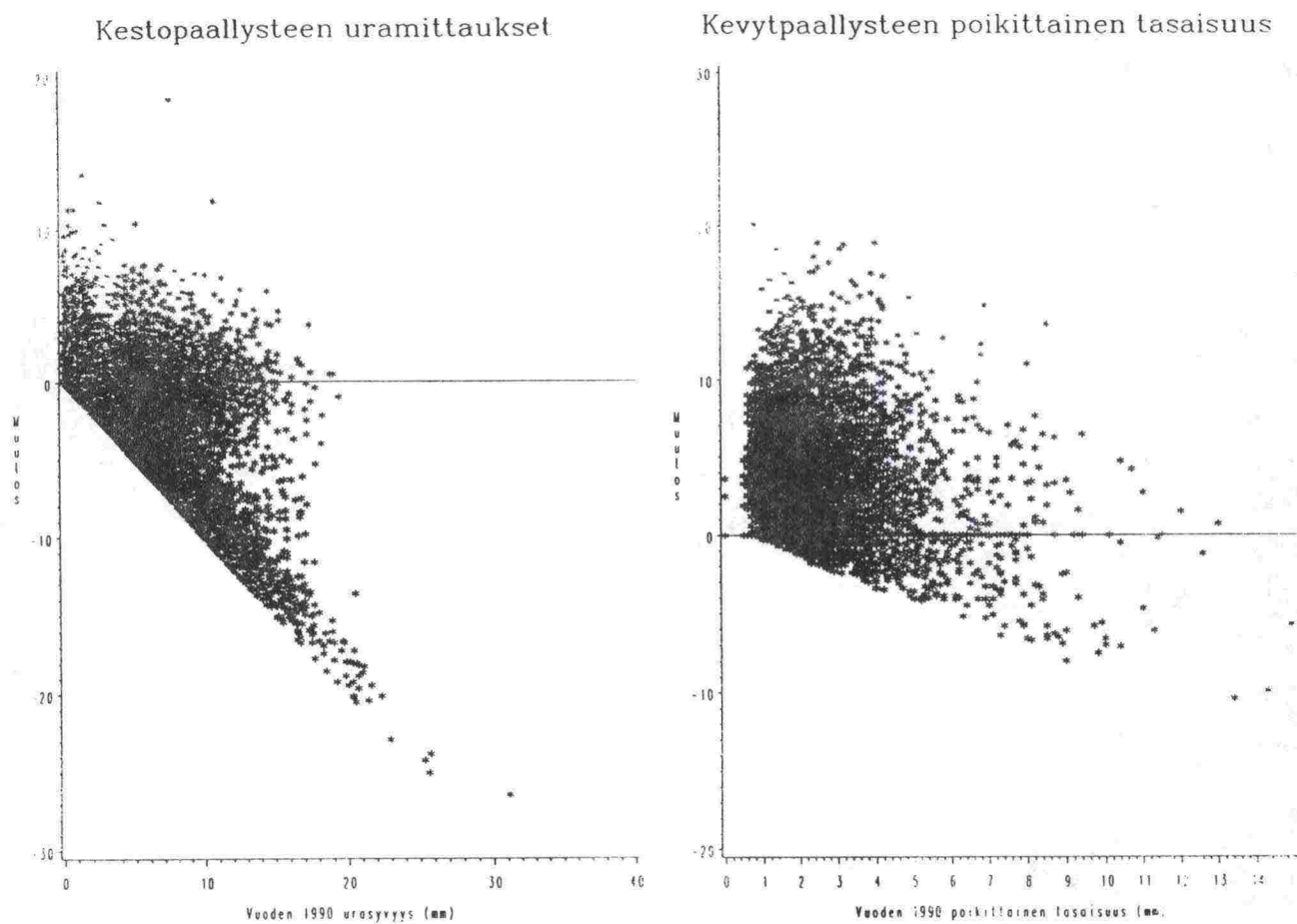
Kestopaallysteen tasaisuusmittaukset



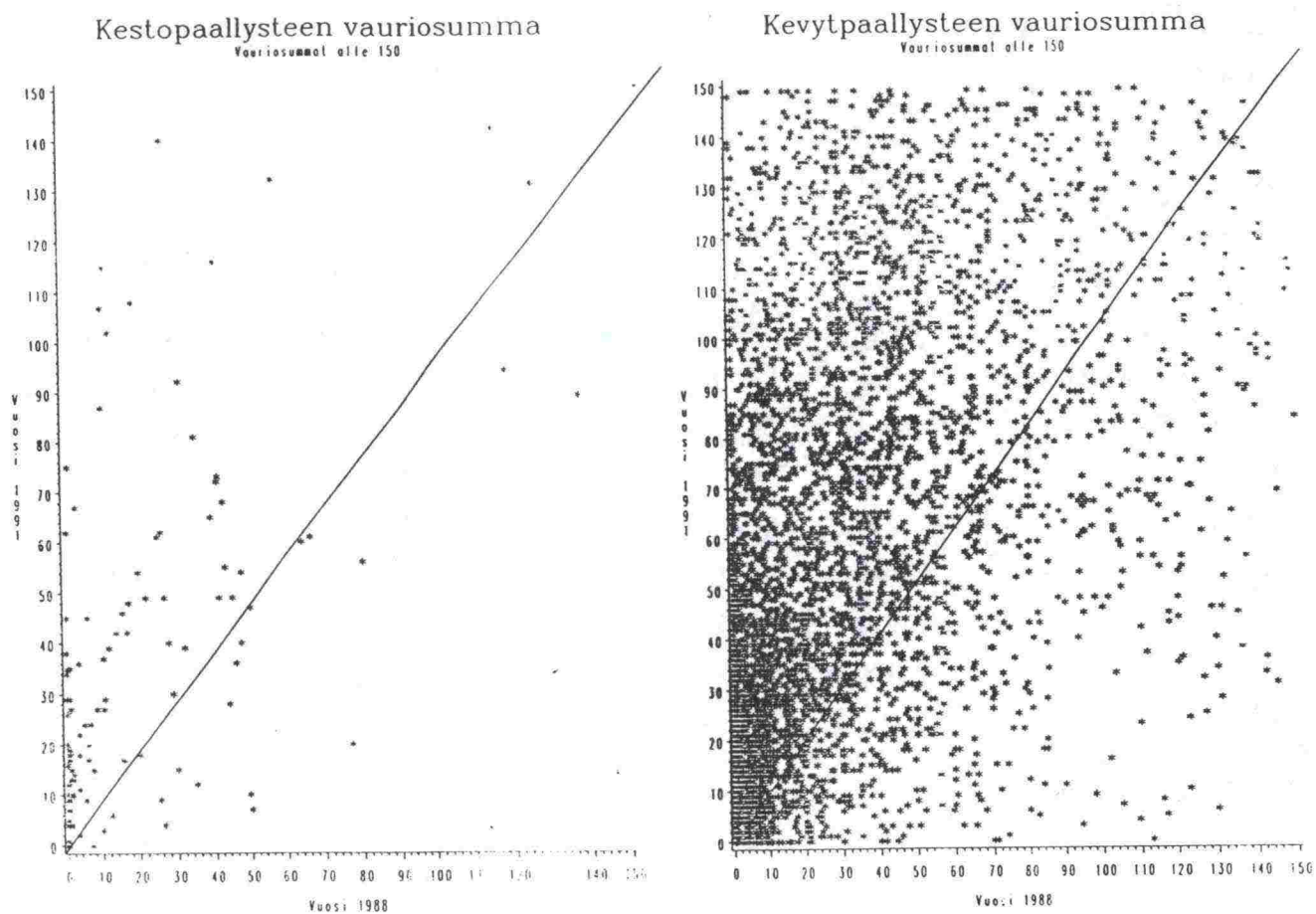
Kevytpaallysteen tasaisuusmittaukset



Kuva 13. Tasaisuuden kehitys 1990 ja 1991 kuntomittauksissa.



Kuva 14. Ura ja poikittaisen tasaisuuden mittausten 1990 ja 1991 erotus.



Kuva 15. Kesto- ja kevytpäällysteteiden vaurioinventointien 1988 ja 1991 tulokset samoilta tiekohdilta. Vaaka-akselilla on mittausulos vuodelta 1988 ja pystyakselilla on vuoden 1991 mittausulos (vain havaintoparit alle 150 m<sup>2</sup>).



## 4. TIEOSAKOHTAISTEN MALLIEN YLEISET PERIAATTEET

### 4.1 YLEISTÄ

Ikäkäyttäytymismallien rajoitukset ovat tärkeitä, koska yleisenä taipumuksena on käyttää malleja niiden määrittelyalueen ulkopuolella.

Valittaessa mallien muotoa tien kunnon ennustamiseen, mallien tulee seurata ensisijaisesti teoriaa ja oikeita selityksiä ja toissijaisesti käytettävissä olevan aineiston määäämiä periaatteita. Minkä tahansa muotoista mallia voidaan käyttää, mutta tilastolliset testit osoittavat vain käytettävän aineiston sopivuuden ko. arvoalueelle. Pääperiaate on, että käytettävä malli kuvaa ympäristön olosuhteita tai niitä fysikaalisia tekijöitä, jotka aiheuttavat tien kunnon, eli tasaisuuden, vaurioiden ja urien, rappeutumisen. Jos käytettävissä on useita malleja, jotka kuvaavat yhtä hyvin ko. kuntotekijää, niitä voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen tilastollisten tunnuslukujen avulla.

Seuraavassa on esimerkki, miten päällysteen vaurioitumisen mallintamista tulee lähestyä. Oletetaan, että vaurioituminen ( $g$ ) on kuormituksen ( $N$ ) funktio. Vaurioitumisen kulmakerroin on tällöin  $dg/dN$ .

Reunaehdot, joita valitun mallin tulee noudattaa ovat seuraavat:

1. Alkuarvo

Vaurion lähtöarvo on nolla.

2. Kulmakerroin alussa

Tätä pitää harkita tarkoin. Useissa tapauksissa vaurioitumisen kulmakerroin ( $dg/dN$ ) on alussa nolla. Tämä on totta vaurioiden ja palvelutason kohdalla, mutta esim urautumiselle ja tasaisuudelle tapahtuu alussa nopea huononeminen, joka tasaantuu keskivaiheilla ja kiihtyy uudelleen vaurioitumisen edistyessä. Tähän vaikuttaa kuudes tarkastelukohta, vaurioiden yhteisvaikutus.

3. Yleinen trendi

Vaurioitumisen kehittyminen on monotonista eli vaurioituminen lisääntyy ajan mukana.

4. Kulmakertoimen muutos

Useimmissa vauriotyypeissä, joihin vaikuttaa ilmasto-olosuhteet, kulmakertoimen arvo muuttuu suuremmaksi ankarien ilmasto-olosuhteiden vallitessa. Tämä merkitsee, että yhtälössä tulee olla itsenäinen muuttuja, joka vaikuttaa kulmakertoimeen  $dg/gN$  samalla tavoin kuin ilmiö vaikuttaa todellisuudessa.

5. Raja-arvo

Tässä eri vauriotyypit eroavat toisistaan eniten. Joillain vauriotyypeillä, kuten vauriosumma ( $m^2$ ) ja palvelutasoindeksi, on selvä maksimi arvo (esim. 100% vaurioita). Tällöin vaurioitumisfunktion  $dg/dN$  kulmakerroin muuttuu lopuksi nolllaksi. Tällöin kaikki funktiot, joiden derivaatta ei ole nolla kun  $N$  lähestyy ääretöntä, eivät ole hyväksyttäviä kuvaaman tämän tyyppisiä vaurioita. Toisenlaisilla vaurioilla, kuten tasaisuudella, ei ole tällaista ehtoa.

6. Vaurioiden yhteisvaikutus

Vaurion viimeiseen kulmakertoimeen saattaa vaikuttaa eri vauriotyyppien



yhteisvaikutus. Selvä esimerkki tästä on urautumisen lisääntyminen tietyn rajan jälkeen. Fyysinen syy tähän on päällysteen halkeilu ja joissain tapauksissa halkeamat eivät vielä edes näy päällysteessä. Vaurioitumisen kulmakerroin  $dg/dN$  alkaa kuitenkin kasvaa. Jotta vaurioitumisen funktio olisi fyysisesti todenmukainen, siihen tulee kuulua riippumaton tekijä nopeutuvasta vaurioitumisesta ko. kohdasta lähtien. On väärin selittää muutosta materiaalin ominaisuuksien muutoksena. Vesi pääsee halkeamasta rakennekerrokseen, joiden ominaisuuksien muutos aiheuttaa lisääntyvää urautumista. Tarkasti ottaen, kun päällysteessä alkavat useat vauriotyypit vaikuttaa yhtäaikaan, vauriotyyppin käyttäytyminen kuormitettaessa muuttuu huomattavasti siitä, mitä se oli alussa.

Mallien tulee seurata todellisia muutoksia. Jos aineisto on puutteellinen, sen vaikutukset tulevat näkymään myös lopputuloksessa. Jokin selittävä tekijä saa suuremman/pienemmän vaikutuksen ilmiön selittämiseen kuin tilanne on todellisuudessa. Toinen yleinen vaaratekijä on kun käsitellään kahta muuttujaa riippumattomina, vaikka ne ovat toisistaan hyvin riippuvia, esim. aika ja kuormitus. Tällöin on mahdollisuus yhdistää ne yhdeksi muuttujaksi (KKL). Ajasta riippuvat muutokset on myös vaikeaa saada näkyviin, jos aineisto ei ole tarpeeksi laaja.

Mallintamista voidaan kuvata yleisesti kolmen erilaisen lähestymistavan mukaan:

**Empiiriset mallit** kehitetään mitatun tiedon perusteella.

Tämän tyyppiset mallit ovat tärkeitä silloin kun ilmiön teoreettista mekanismia ei tunneta (esim. päällysteen purkautuminen, saumahalkeamat). Myös toimenpiteen vaikutuksen mallintamiseen empiirinen mallintaminen sopii.

**Teoreettiset mallit** syntyvät ilmiön perustekijöiden hallitsemisesta, esim.  $F=ma$ . Puhtaasti teoreettisia malleja tierakenteista esiintyy laskettaessa jännityksiä ja muodonmuutoksia kimmoteoriaan perustuen. Tällaisia malleja ei ole olemassa urautumiseen, halkeiluun tai rakenteen väsymiselle. Teoreettisia malleja voidaan käyttää esim. tien rasisutusten laskemiseksi, joita puolestaan voidaan käyttää arvioitaessa vaurioitumista.

**Teoreettis-empiiriset mallit** kehitetään käyttämällä yhdessä teoreettisia malleja ja mitattua tietoa. Mallin muoto ja muuttujat ovat teoreettisista tarkasteluista, mutta mallin kertoimet on määritetty mittaustiedosta (yleensä parhaat).

On tärkeää myöntää, ettei päällystetyille tierakenteille ole mahdollista tehdä puhtaasti teoreettista mallia vaurioitumisen ennustamiseksi. Vaikka tien rakenteen jännityksiä voitaisiinkin tarkastella teoreettisesti, on niistä malleista vielä pitkä harppaus todellisten vaurioiden tai palvelutasotekijöiden ennustamiseen. Mallien kehittämistä rajoittaa käytettävissä olevat mittausten menetelmät ja -resurssit.

## 4.2 TAVOITTEET JA NYKYISET TARPEET TIEOSAKOHTAISILLE MALLEILLE

Tässä työssä käsitellään tieverkon pintakuntoa kuvaavia muuttujia, kestopäällysteteillä tasaisuutta, uria ja vauriosummaa ja kevytpäällysteteillä tasaisuutta ja vauriosummaa.

Kuntojakaumat muodostuvat 100 m mittaustuloksista, joten kunnon kehittymistä pitäisi pystyä ennustamaan juuri 100 m matkalle. Tästä seuraa kaksi ennustamistarkkuuteen vaikuttavaa seikkaa:

- suomalaisen tiestön rakenne on hyvin epähomogeenista, joten mitä lyhyempi on tarkasteltava pituus sitä vähemmän tiestön epähomogeenisuus vaikuttaa.
- mittausten kohdistaminen juuri samaan kohtaan on vaikeaa.

Nykyistä mittauskäytäntöä voidaan pitää hyvänä. Tavoitteena on, että mittauksia on lähes koko verkolta seuraavasti:

Vauriosumma: aika viimeisestä mittaustuloksesta on alle 3 vuotta.

Tasaisuus:	“	pääteillä on alle 1 vuosi
		muilla teillä alle 3 vuotta
Urat:	“	keskimäärin alle 2 vuotta.

Muita käytössä olevia yleisiä tietoja ovat:

KVL  
KKL  
päällystelaji  
päällysteen ikä  
tieosan keskim. kevätkantavuus  
tieosan kantavuusaste (kevätkant./tavoitekant.)

Esimerkkeinä yleisimmistä tilanteista, jolloin joudutaan ennustamaan eri mallien avulla tarvittu kuntotila:

- Arvioitaessa toimenpiteen jälkeistä kuntotilannetta, määritettäessä ns. alkuarvoa.
- Arvioitaessa juuri päällystetyn tien kunnon kehitystä
- Arvioitaessa mittaustuloksen jälkeistä kunnon kehitystä, mikä on tällä hetkellä näiden mallien tärkein tehtävä
- Arvioitaessa uuden mittaustuloksen loogisuutta määritetään sallitut minimi- ja maksimirajat.



## 5.VAURIOITUMISEN MALLINTAMINEN

Vaurioitumismalleja estimoititiin tilanteisiin, jossa ei ole olemassa vauriotietoa- tai on yksi inventointitieto (kolmen vuoden malli). Estimointia varten aineistosta rajattiin mukaan vain mielenkiintoinen alue; vauriosumma alle 120 m<sup>2</sup>. Vauriosumman jakauma on hyvin vino eikä näin ollen täytä regressioanalyysin vaatimusta selitettävän muuttujan normaalijakaumasta. Ongelmaa voidaan vähentää logaritmoimalla muuttujat.

### Vaurioitumisen alkamisajankohta

Vaurioitumisen alkamista pyrittiin estimoimaan joukosta, johon oli valittu osuudet, joilla verkkohalkeamia ei ole yli 5 m<sup>2</sup>/10 m<sup>2</sup> ja vauriosumma ei ole yli 10 m<sup>2</sup>. Käytettävissä olleesta aineistosta ei kuitenkaan saatu estimoitua tyydyttäviä regressiomalleja vaurion alkamisajankohdalle. Sensijaan kohtuulliset logistiset mallit voitiin estimoida. Nämä mallit on esitetty seuraavassa kappaleessa (mallit P{vs < 10}).

### Vauriosumma, ei aiempaa inventointia

Vauriosumman kehittymistä on aiemmin tehdyssä (helmikuu 1992) tarkastelussa estimoitu tieosakohtaisesti. Mittaustiedon puuttuessa voidaan näin saatuja kaavoja käyttää ko. tapauksessa.

- I Tässä tutkimuksessa käytössä olleesta aineistosta estimoititiin myös mallit vauriosummalle käyttäen ikää ja muita muuttujia selittäjänä. Mallien selitysasteet jäivät varsin alas: AB-teillä  $R^2=0.18$  (N=338) ja ÖS-teillä  $R^2=0.15$  (N=7870). Kun ainoana selittäjänä käytettiin ikää, laski AB-mallin selitysaste ollen 0.13.

Estimoidut mallit ovat:

AB-tiet:

$$vs = 4.95 * ikä^{0.69} * iri^{0.16}, R^2 = 0.18$$

$$vs = 6.2 * ikä^{0.66}, R^2 = 0.13$$

ÖS-tiet:

$$vs = 3.05 * ikä^{0.64} * iri^{0.23} * raskas-kvl^{0.22}, R^2 = 0.15$$

$$vs = 3.13 * ikä^{0.71} * raskas-kvl^{0.24}, R^2 = 0.15$$

- II Tutkimuksessa ongelmaa lähestyttiin myös binäärisiä logit-malleja käyttäen. Tällöin estimoititiin binääristen muuttujien (vauriosumma yli 10, yli 30 ja yli 60 m<sup>2</sup>) todennäköisyyttä. Saadut mallit sopivat kohtalaisen hyvin aineistoon (vuoden 1991 inventointitiedot).

Logit-mallit ovat muotoa  $P = \exp(a+b_1*x_1+b_2*x_2) / (1+\exp(a+b_1*x_1+b_2*x_2))$ , jossa P on 0/1 -muuttujan arvon 1 todennäköisyys ja  $x_i$  :t ovat selittäjät. Näin estimoidut mallit kertovat siis esimerkiksi millä todennäköisyydellä tiellä on yli 10 m<sup>2</sup> vaurioita (Kuva 16).

AB-teille paras malli oli yksinkertainen vain päällysteen ikää selittäjänä käyttänyt malli. Öljysorateille lisämuuttujien (kvl-raskaat ja iri) mukaan ottaminen lisäsi selitysvoimaa hiukan (gamma = logistisen mallin selitysaste).

Estimoidut mallit olivat:

AB-tiet

$$P(\text{vauriot yli } 10) = 1 / (1 + \exp(0.66 - 0.18*ikä)), \gamma = 0.52$$

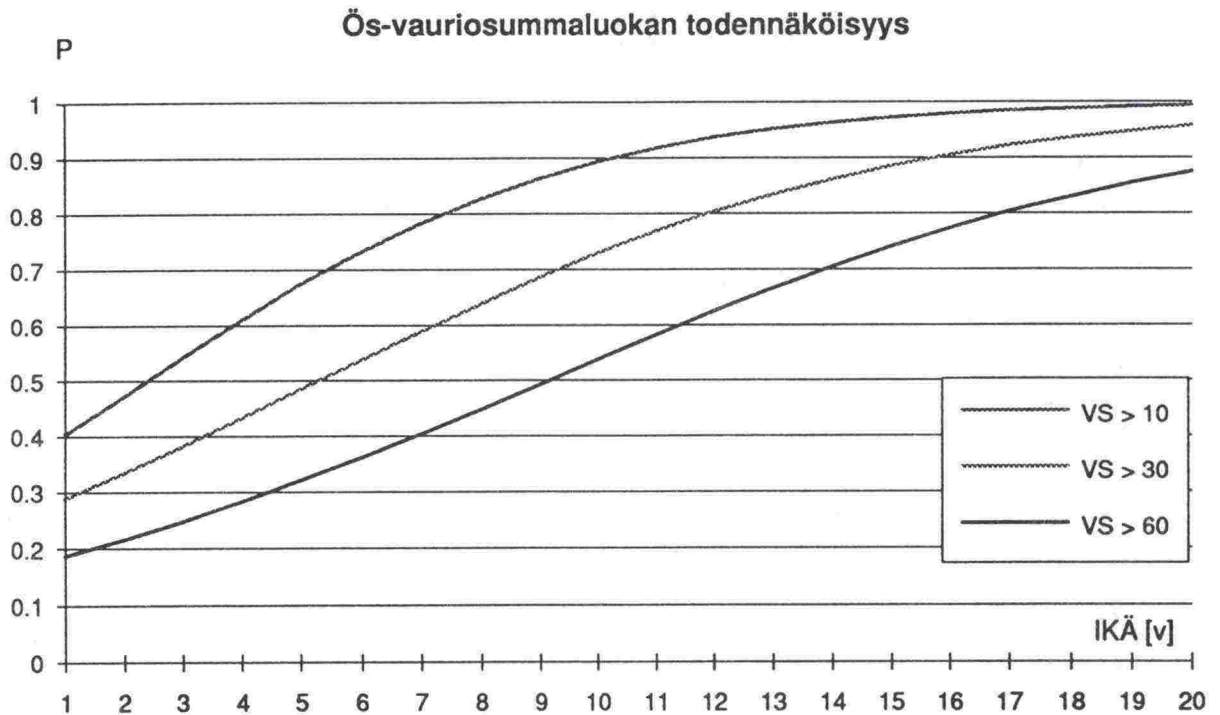
ÖS-tiet

$$P(\text{vauriot yli } 10) = 1 / (1 + \exp(0.67 - 0.28*ikä)), \gamma = 0.63$$

$$P(\text{vauriot yli } 30) = 1 / (1 + \exp(1.11 - 0.21*ikä)), \gamma = 0.54$$

$$P(\text{vauriot yli } 60) = 1 / (1 + \exp(1.65 - 0.18*ikä)), \gamma = 0.51$$





Kuva 16. Vauriosummaluokan todennäköisyys iän mukaan (AB tiet).

#### Vauriosumma, kun mittaustulos on käytössä

Vauriosumman kolmen vuoden kehitys: Malli muodostettiin logaritmoimalla ensin vauriosummamuuttujat ja selittäjät sekä mallintamalla tämän jälkeen lineaarisella regressiolla. Kokeilujen jälkeen todettiin, että paras tapa huomioida liikennemäärä on käyttää luokiteltua liikennemäärää.

Paras aiempaa inventointitulosta käytävä malli (kolmen vuoden muutos) oli muotoa:  
 $vs(t+3) = a^* vs(t)^b$ , jossa  $a$  riippuu liikennemäärästä ja  $b$  riippuu verkkohalkeamista.  
 Päällysteen ikä ei lisännyt mallien selitysasetta merkittävästi.

Estimoidut mallit ovat (kuva17):

AB-tiet:

$$vs(t+3) = 16.47 * vs(t)^{0.36}, \quad R^2 = 0.45$$

ÖS-mallit:

$$R^2 = 0.48$$

verkkohalkeamat alle 10

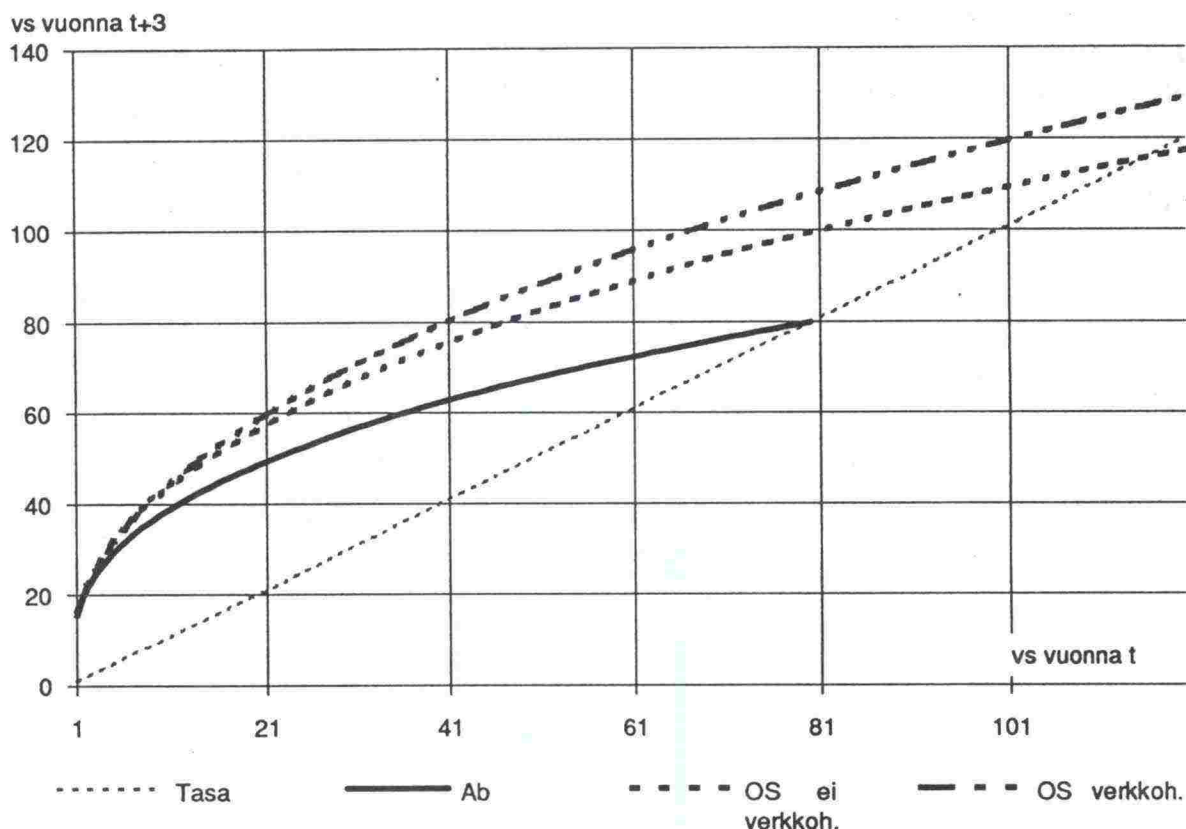
$$vs(t+3) = 16.51 * vs(t)^{0.41}$$

verkkohalkeamat yli 10

$$vs(t+3) = 16.51 * vs(t)^{0.44}$$

Mallit on estimoitu vauriosummille alle  $120 \text{ m}^2$ . AB-teiden osalta malli toimii vain alueella  $vs(t) < 80 \text{ m}^2$ .

### Ennuste vauriosumman kolmen vuoden kehitykselle



Kuva 17. Vauriosumman kehittymisen ennuste kolmelle vuodelle.

Kolmen vuoden malleista parhaiten toteutuneen kanssa korreloi edellä esitetty malli (korrelaatio n. 0.7).

VTT:n mallia testattiin laskemalla normaalisti käytetyn menettelyn avulla kerroin  $a$  vuoden 1988 tiedoista ja vertaamalla näin saadulla kaavalla laskettua vuoden 1991 vauriosummaa inventointitulokseen. VTT:n mallille laskettu korrelaatio oli n. 0.5. Tutkimuksessa estimoitii myös lineaarinen malli, joka oli kuitenkin huonompi kuin tässä kappaleessa esitetty.

## 6. TASAISUUDEN MALLINTAMINEN

Tasaisuusmallit estimoitiin Hämeen aineistosta vuosilta 1990 ja 1991. Pois rajattiin osuudet, joilla IRI-arvo oli parantunut mittaushajontaa (0.2 mm/m) enemmän. Edelleen käsittelyyn rajattiin vain IRI-alue 1-4.5 mm/m AB-teillä ja 1-5 mm/m ÖS-teillä. Useista kokeilluista selittäjistä malliin jäivät vain IRI:n edellisen vuoden mittausarvo ja luokiteltu KVL.

Mallit kuvaavat yhden vuoden aikana tapahtuvaa muutosta IRI-arvossa.

AB - tiet:

$$\begin{array}{ll} \text{KVL alle 1500,} & R^2 = 0.85 \\ \text{IRI}(t+1) = 0.11 + 1.03 * \text{IRI}(t) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{KVL yli 1500,} & R^2 = 0.79 \\ \text{IRI}(t+1) = 0.14 + 1.03 * \text{IRI}(t) \end{array}$$

ÖS - tiet:

$$\text{IRI}(t+1) = 0.14 + 1.04 * \text{IRI}(t), \quad R^2 = 0.85$$

Tämän lisäksi testattiin trendimallia, joka oli muotoa

$$\text{IRI}(t+1) = \text{IRI}(t) + (\text{IRI}(t) - \text{IRI}_0) / \text{päällysteen ikä}.$$

Päällysteen alku-IRInä ( $\text{IRI}_0$ ) käytettiin AB-teillä 1.2:ta ja ÖS-teillä 1.5:tä.

Näin saadut trendimallit korreloivat mitatun IRIn kanssa hieman huonommin kuin edellä esitetyt mallit. Trendi yliarvioi paikoin huomattavasti IRIn kehitystä.

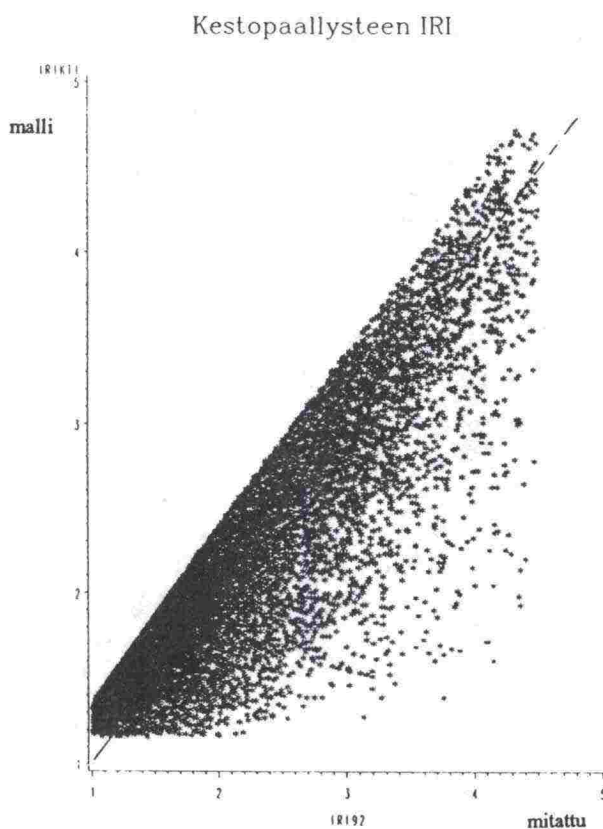
Kuvissa 18 ja 19 on verrattu kahden mallin antamaa ennustetta seuraavan vuoden mitattuun tulokseen. Kuvassa 18 on vuoden 1990 mittaustuloksen perusteella ennustettu IRI mallin avulla seuraavan vuoden IRI arvoa. Vaaka-akselilla on vuoden 1991 todellinen IRI arvo. Kuvassa 19 on ennustettu seuraavan vuoden arvoa trendin mukaan, jolloin kuvan mukaan yliarvioidaan vuodessa tapahtuvaa kehitystä.

Mallien keskimääräinen ennustevirhe on noin  $\pm 2 \sqrt{\text{MSE}}$ , missä MSE on mallien virhetermien neliöiden keskiarvo. MSE:t ovat malleille: AB alle 1500 MSE=0.0934, AB yli 1500 MSE=0.103 ja ÖS MSE=0.125 (MSE = mean square error).

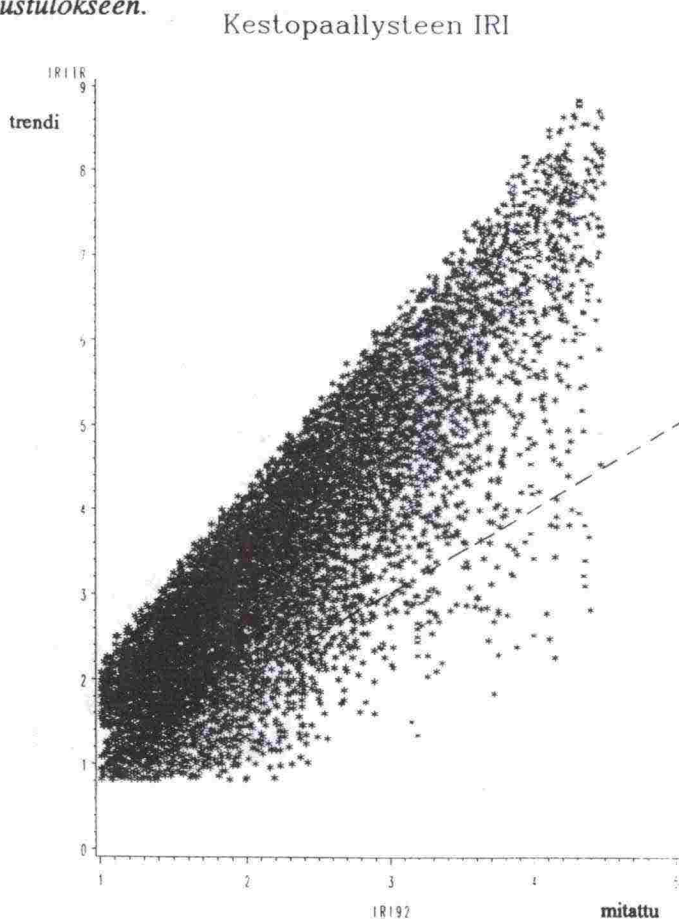
## 7. URAUTUMISEN MALLINTAMINEN

Ura-aineistoa ei voitu kunnolla käyttää mallien muodostamiseen. Varsin huomattavassa osassa havaintoja (noin 30 %) oli maksimi uran keskiarvo vuonna 1991 parempi kuin 1990. Vaikka parantuneet kohdat poistettiin aineistosta ei tyydyttävää uramallia voitu kuitenkaan estimoida. Estimoidussa lineaarisessa mallissa liikennemäärä tuli merkittäväksi selittäjäksi, mutta sen kerroin oli pieni. Myös karsitusta aineistosta estimoitu malli ennusti tilanteen paranevan tietyn rajan jälkeen. Mallin selitysaste jäi varsin huonoksi. Tässä luvussa ei täten esitetä ollenkaan uramallia.





*Kuva 18. IRI mallin avulla ennustettu seuraavan vuoden arvo verrattuna seuraavan vuoden mittaustulokseen.*



*Kuva 19. Trendin avulla laskettu arvo verrattuna seuraavan vuoden mittaustulokseen.*

## 8. LOPPUPÄÄTELMÄT JA VALITTU TOTEUTUSMALLI

### Lähtöaineisto tuotantomittauksista

Lähtöaineisto osoittautui ennakko-odotuksia huonommaksi. Vaikka vaurioinventointeja on tehty vuodesta 1986 lähtien, oli samoja kohteita inventoitu kahteen kertaan hyvin vähän. Kolmen vuoden mittauskierron toiselle kierrolle ollaan vasta pääsemässä vuosina 1992-1993. Vastaavasti palvelutasomittarit ovat olleet varsinaisessa tuotantokäytössä yhdenmukaisine ohjelmistoineen vasta vuodesta 1991 (IRIn osalta vuodesta 1990) vaikka ensimmäiset PTM mittaukset tehtiin jo vuonna 1989. Uran ja tasaisuuden osalta tarkastelujakso (1 vuosi) on liian lyhyt osoittamaan ilmiön luonnetta.

Lähtöaineiston laajuus oli siis tutkimusta tehtäessä (maaliskuu 1992) vaatimaton. Havaintoineiston laatua ollaan käsitelty luvussa 5 ja lyhyesti sanoen se ei täytä tiestön rappeutumisen perusoletusta: "Tien kunto ei parane, jos mitään toimenpiteitä ei tehdä". Jos tulosten epäloogisuuden johdosta joudutaan poistamaan 30-60% mittauspisteitä, voidaan epäillä loppujenkin pisteiden luotettavuutta. Mittausten laadunvalvontaan ja rekisteröintiin tulee kiinnittää huomiota.

Ikäkäyttäytymisen mallintamiseen on tehty muutamia perustavaa laatua olevia tutkimuksia Suomessa. VTT on mitannut TIEH toimesta ns. havaintotieverkkoa (81 km AB-teitä ja 51 km ÖS-teitä) ja TIEH on perustanut ns. otostieverkon (1500 km AB- ja 1500 ÖS-teitä). Näistä tutkimuksista voitaisiin saada hyvääkin perustietoa, jos niiden mittaukset pystyttäisiin hoitamaan pitkäjännitteisesti eri kuntomuuttujien suhteen (tasaisuus, vauriosumma, urat ja kantavuus). Tällaisessa empiirisen tiedon perusteella tehtyjen mallien käytössä tulee olla kuitenkin hyvin varovainen, koska mallit edustavat vain sitä aineistoa, missä ne on tehty. Havaintoja kerätessä tulee tarkoin päättää, millaista tutkimustilannetta ne edustavat.

### Mallien rakenne

Eri vauriotekijöiden käyttäytymistä voidaan arvioida asiantuntijoiden näkemyksen mukaan suhteellisen hyvin. Tällöin kuitenkin tarvitaan sellaisia tekijöitä, mitä ei ole mahdollista kerätä olemassaolevalta tieverkolta. Mallien rakenteellinen identifioiminen on vaikeaa ja järkevänkin rakenteen perusteleminen käytössä olevan aineiston kanssa mahdotonta. Toinen mallintamisessa syntyvä ongelma on valittavien parametrien arvon määrittäminen subjektiivisten näkemysten pohjalta.

## TASAISUUSMALLIT

### Alkuarvo

Alkuarvo tarkoittaa toimenpiteen jälkeistä kuntotilaa, sillä yleensä se ei ole nolla. Alkuarvolla on keskeinen merkitys tehtäessä lineaarista kunnonkehitystrendiä ja valittaessa taso, mistä yleensä hidas kuntotilan rappeutuminen alkaa.

Alkuarvot saatiin VTT:n "Uusien päällysteiden tasaisuus 1991" -tutkimuksen pohjalta:

AB-tiet	IRI = 1.3
ÖS-tiet	IRI = 1.6

### Mittaustulos käytössä

Tasaisuuden osalta lopputulos oli varsin hyvä, vaikka selittäjistä tulivat merkittäviksi vain edellinen IRI-arvo. Kestopäällysteiden (1) ja kevytpäällysteiden (2) malli vastaa niitä odotuksia, mitä projektiryhmällä oli tasaisuuden suhteen (ks. liite 1, kuva 1).

$$(1) \quad \text{IRI}(t+1) = 0.13 + 1.03 \cdot \text{IRI}(t)$$

$$(2) \quad \text{IRI}(t+1) = 0.14 + 1.04 \cdot \text{IRI}(t)$$

### Ei mittaustulosta

Mittaustiedon puuttuessa IRI-arvo määritetään päällystämivuoden perusteella käyttäen alkuarvojen ja em. kaavan antamaa vuosittaista lisäystä.

## URAMALLIT

### Alkuarvo

Päällystystoimenpiteen jälkeisen alku-uran suuruudeksi valittiin 2 mm.

### Mittaustulos käytössä

Uran ennustamiseen käytetään lineaarista kehitystä päällystämivuodesta (alku-ura huomioiden) viimeiseen mittaustulokseen ja jatketaan siitä edelleen. Kehitystä ei kuitenkaan määritetä mittaustuloksesta, joka on mitattu päällystämivuonna uuden pinnan päältä, vaan tällöin käytetään mittauksesta eteenpäin VTT:n uramallia.

### Ei mittaustulosta

Käytössä olevan aineiston perusteella ei saatu muodostettua mallia, mikä voitaisiin hyväksyä. Toteutusmalli perustuu entiseen ns. VTT:n uramalliin:

$$\text{URA} = a \cdot \text{ikä}$$

missä

ikä = ennustevuoden ja päällystämivuoden erotus

$$a = 0.0004 \cdot \text{KVL} \quad \text{kun KVL} < 2000$$

$$a = 0.000217 \cdot \text{KVL} + 0.4 \quad \text{kun KVL} > 2000$$

### Raja-arvo

Sallittu ennusteen max ura-arvo on:  $U(\text{max}) = U_m + 2,0 + 2,0 \cdot \text{VTT:n kaava}$   
jossa  $U_m = \text{Mittaustulos}$

Sallittu ennusteen minimiarvo saadaan VTT:n funktion avulla (ks. liite 1, kuva 2).



## VAURIOMALLI

### Alkuarvo

Vauriosumman alkuarvo on nolla.

### Mittaustulos käytössä

Vauriosumman käsittely on hyvin ongelmallista mittauksien epätarkkuuden ja vauriosumman indeksiinomaisuuden (yhdistelmä eri vauriotyypeistä, joiden kehittymiseen vaikuttavat eri tekijät) vuoksi.

Lineaariset mallit soveltuvat hyvin huonosti kuvaamaan ilmiötä, jota todennäköisyyksiin perustuva, logistinen mallintaminen selittäisi paremmin. Tällaista ratkaisua ei voida nykyjärjestelmien puitteissa käyttää.

Toteutettava malli on entinen, VTT:n 1985 tekemä hieman korjattu malli, johon liitetään ennustetun maksimiarvon määrittäminen.

$$VS = a \cdot IKÄ^n$$

$$a = VS_{\text{mitattu}} / ikä^n$$

missä:

$$n = \begin{matrix} 1.6 \text{ kestopäällysteteillä ja} \\ 1.8 \text{ kevytpäällysteteillä} \end{matrix}$$

$IKÄ$  = ennustevuoden ja päällystämismuoden erotusta vuosissa

$ikä$  = mittausvuoden ja päällystämismuoden erotusta

### Raja-arvo

Kertoimen  $a$  korkein sallittu arvo on 8 (ks. liite 1, kuvat 3 ja 4).

## 9. JATKOTOIMENPITEET

Seuraavassa on lueteltu tämän projektin kuluessa esille tulleita kehitystarpeita ja jatkotyöehdotuksia. Nämä voidaan ryhmitellä kolmeen ryhmään: mallinnusasiat, mittausasiat ja tietohallintoasiat.

### Mallinnusasiat

- Vuoden 1992 vaurioinventoinneissa tulee toistamiseen mitattavaksi huomattava määrä kohteita. Tämän aineiston kerääminen ja testaaminen tämän projektin rutiinien avulla tuo lisätietoa tuotantomittausten laadusta ja käytettävyydestä mallinnuksessa.
- Otosteiden mittausaineiton hyödyntäminen mallien teossa.
- Tieosakohtaisen vaurioitumismallien antamien tulosten vertaaminen verkkotason stokastisiin rappeutumismalleihin.
- Uusien mallien kehittäminen sitä mukaa, kun parempia lähtöaineistoja on saatavilla
- Piirikohtaisten vauriomallien kehittäminen.

### Mittausasiat

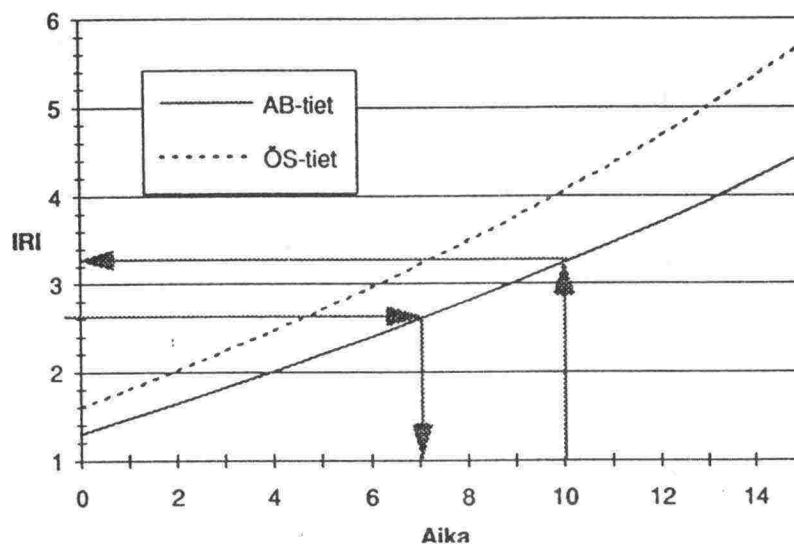
- Uramittauksen laskentatavan kehittäminen mm. negatiivisen uran ongelman ja mittaushajonnan suhteen.
- Vuosittaisen minimimittaustarpeen arvioiminen, jota tarvitaan mm. tiepiirien vertailtavuuden parantamiseksi ja toiminnan tehostamiseksi.
- PTM-mittausten ja vaurioinventointien arviointi ja kehittäminen nykyistä luotettavampien lähtötietojen saamiseksi.

### Tietohallintoasiat

- Tie- ja kuntorekistereiden tietojen laadunvalvonta. Esim. toimenpiteiden rekisteröintiä ja virheellisten arvojen eliminointia tulee kehittää.
- Mallinnukseen sopivien, useiden vuosien aineistojen järjestelmällisen keruun suunnittelu.

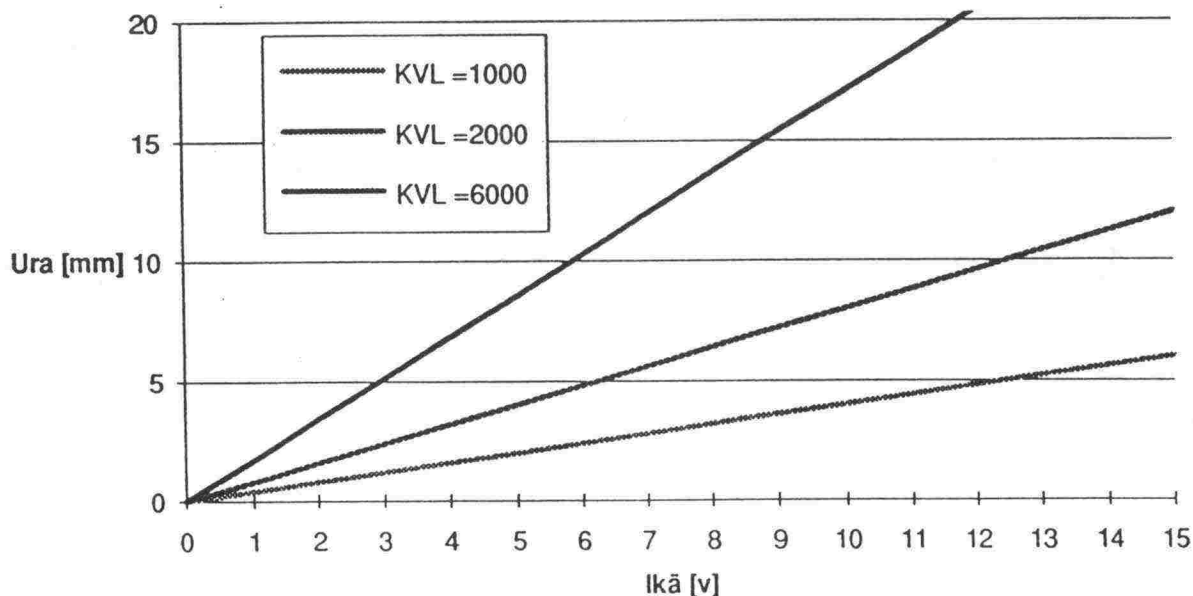
## Liite 1.

## IRI-arvon muuttuminen



Kuva 1. IRI-arvon muuttuminen päällysteen ikääntyessä. Lukuohjeena AB-tien IRI:n 2.6 mm/m muutos kolmessa vuodessa (arvoon 3.3 mm/m). Huom. IRI:n muutosnopeus ei riipu suoraan päällysteen iästä.

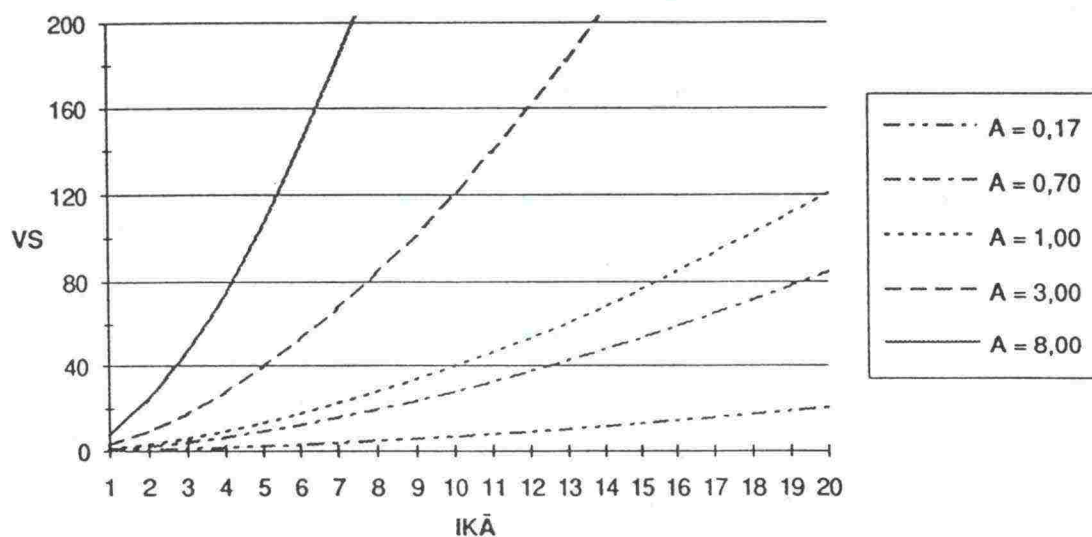
## VTT:n mallin mukainen urasyvyys



Kuva 2. VTT:n mallin mukainen urasyvyyden kehitys.

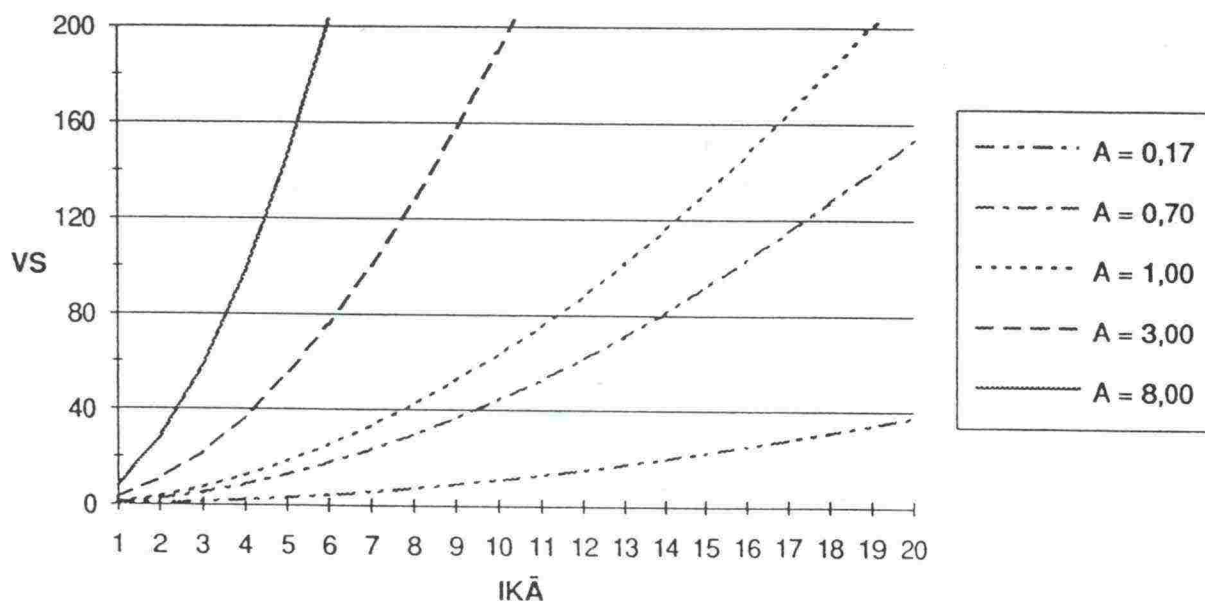


VTT:n vauriomalli / kestopäällystetiet



Kuva 3. VTT:n vauriosummamalli  $vs = a \cdot t^{1,6}$  kestopäällysteteille eri  $a$ :n arvoilla.

VTT:n vauriomalli / kevytpäällystetiet



Kuva 4. VTT:n vauriosummamalli  $vs = a \cdot t^{1,8}$  kevytpäällysteteille eri  $a$ :n arvoilla.

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 10/1992 Kehittämishankkeet tielaitoksen tuloksenteossa. TIEL 3200066
- 11/1992 REA-menetelmä; työnsuunnittelu- ja valvontamenettely. TIEL 3200067
- 12/1992 Moottoriliikennetien liikennevirran ominaisuudet. TIEL 3200068
- 13/1992 Aloitetoiminta johtamisen ja kehittämisen apuna; kirjallisuuskatsaus ja pohdinta tielaitoksen näkökulmasta. TIEL 3200069
- 14/1992 Tielaitoksen tukikohtaverkko. TIEL 3200070
- 15/1992 Pricing of Traffic Noise and Exhaust Gases in Road Planning. TIEL 3200071E
- 16/1992 Prissättning av avgaser och buller vid vägplanering. TIEL 3200072R
- 17/1992 Tienpitokoneisiin liittyvät keksinnöt. TIEL 3200073
- 18/1992 Tietullien tekniset järjestelmät. TIEL 3200074
- 19/1992 Mätning av underhållets resultat. TIEL 3200075R
- 20/1992 1980-luvulla toteutettuja taajamateitä; taajamakuva- ja toimivuustarkastelu. TIEL 3200076
- 21/1992 The Effects of Motorways on the National Economy. TIEL 3200077E
- 22/1992 Quality Requirements of Prefabricated Strip Drains; Quality Control and Test Methods. TIEL 3200057E
- 23/1992 Sairaalahoittoa vaatineet loukkaantumiset liikennealueilla Suomessa vuonna 1989. TIEL 3200078
- 24/1992 Liikenne ja maankäyttö, esiselvitys. TIEL 3200079
- 25/1992 Liikenteen profiili. TIEL 3200080
- 26/1992 Tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisen vaikutukset. TIEL 3200081
- 27/1992 Yleisten teiden liikennemelu, otantaselvitys, TIEL 3200082
- 28/1992 Tien suuntauksen suunnittelu. TIEL 3200083
- 29/1992 Onnettomuudet pääteiden tasoliittymissä. TIEL 3200084
- 30/1992 Jätkäkynttilä. TIEL 3200085
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 32/1992 Talvikunnossapidon sääindeksi. Tuotannon kehittämispalvelut
- 33/1992 Tieverkon kehittämishankkeiden hallinnointi: Projektioorganisaatiot, loppu-raportti. TIEL 3200087
- 34/1992 Tienvarsialueiden kasvittamisen ja hoidon kehittäminen luonnonmukaisempaan suuntaan. TIEL 3200088

ISBN 951-47-6068-9  
ISSN 0788-3722  
TIEL 3200089